PROTOCOLE D'ÉVALUATION DE LA TRAITABILITÉ DES SÉDIMENTS, DES SOLS ET DES BOUES À L'AIDE DES TECHNOLOGIES MINÉRALURGIQUES

Document préparé pour la :

Section Éco-innovation technologique
Programme de développement et de démonstration technologiques
Direction de la Protection de l'Environnement
Environnement Canada

rédigé par :

Anne Gosselin, ing., M. Sc.
INRS-Géoressources

Denis Blackburn, ing., M. Sc.
Centre de Recherches Minérales

Mario Bergeron, Ph. D.
INRS-Géoressources

Sainte-Foy, mars 1999

101-00707/

Ce document est publié avec l'autorisation du ministère de l'Environnement.

Ministère des Travaux publics et Services gouvernementaux du Canada 1997
N° de catalogue : En 40-542/5-1997F
ISBN : 0-662-82406-7

PERSPECTIVE DE GESTION

Ce document est publié dans le cadre du "Programme de Développement et de Démonstration Technologiques" d'Environnement Canada qui vise à appuyer les initiatives du secteur privé dans le développement et la démonstration de nouvelles technologies environnementales. Ce programme est associé au Bureau fédéral de développement régional du Québec (BFDR-Q) et fait partie intégrante du Plan d'action Saint-Laurent Vision 2000 d'Environnement Canada.

AVIS DE RÉVISION

Le présent document a été examiné par la Direction de la Protection, Environnement Canada, qui en a autorisé la publication. Cette autorisation ne signifie pas nécessairement que le contenu du rapport reflète les opinions et les politiques du Ministère. Les mentions de marque de commerce et de produits commerciaux qui apparaissent dans ce rapport ne signifient aucunement que leur utilisation est recommandée.

COMMENTAIRES DES LECTEURS

Veuillez adresser vos commentaires sur le contenu du présent rapport à la Direction de la protection, Section Éco-innovation technologique, Environnement Canada, 105 rue McGill, 4^{e} étage, Montréal (Québec) H2Y 2E7.

Résumé

Les technologies minéralurgiques offrent un potentiel remarquable pour extraire les contaminants des sédiments, des sols et des boues contaminés. Malheureusement, les méthodes actuelles de caractérisation et d'analyses granulométriques et chimiques nous renseignent très peu sur le potentiel et les limites de ces technologies quant au traitement ou à la valorisation possible des matrices contaminées.

C'est pourquoi, le présent document vise à décrire un protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques.

La caractérisation par l'approche minéralurgique repose principalement sur la connaissance de la granulométrie du matériel, de la distribution des contaminants dans les différentes fractions granulométriques, de l'identification de leur composition minéralogique (dans le cas de contaminants inorganiques) et du degré de libération des contaminants inorganiques présents.

Les informations résultant de la caractérisation portent donc sur le degré de libération des contaminants ainsi que sur la taille, la masse volumique, les propriétés des surfaces, les propriétés ferromagnétiques et la conductivité électrique des particules. Les équipements minéralurgiques appropriés sont sélectionnés à partir de ces informations et un schéma préliminaire de traitement peut ensuite être élaboré. Ce dernier doit être ensuite validé et optimisé à l'aide d'essais à petite échelle. Par la suite, les coûts reliés à la réalisation d'un projet de décontamination peuvent être déduits sommairement mais une évaluation plus poussée de ces coûts doit reposer sur une étude approfondie basée sur des essais effectués à l'échelle semi-industrielle puis confirmés ensuite par un projet de démonstration sur le terrain, à l'échelle réelle.

Table des matières

Perspective de gestion iii
Avis de révision iii
Commentaires des lecteurs iii
Résumé iv
Table des matières vi
Liste des tableaux viii
Liste des figures ix
Glossaire xi
Remerciements xiv

Chapitre 1
Introduction 1
1.1 Contexte 1
1.2 Objectif du document 3
1.3 Présentation sommaire du protocole 4
1.4 Contenu du document 4

Chapitre 2
Procédures d'échantillonnage 7
2.1 Échantillonnage des sédiments 10
2.1.1 Caractéristiques spécifiques 10
2.1.2 Documents de référence 10
2.2 Échantillonnage des sols 11
2.2.1 Caractéristiques spécifiques 11
2.2.2 Documents de référence 11
2.3 Échantillonnage des boues 12
2.3.1 Caractéristiques spécifiques 12
2.3.2 Documents de référence 12

Chapitre 3
Caractérisation par l'approche minéralurgique 13
3.1 Analyse granulométrique 15
3.1.1 Définition et but de l'analyse granulométrique 15
3.1.2 Les tamis 17
3.1.3 Préparation des échantillons 18
3.1.4 Méthodes de tamisage 19
3.1.5 Traitement des résultats 22
3.1.6 Élutriation 24
3.1.7 Analyse de particules très fines 26
3.2 Localisation des contaminants organiques et inorganiques 27

3.2.1 Analyses par fractions granulométriques et totale 27
3.2.2 Analyses des contaminants organiques et inorganiques 30
3.2.3 Traitement des résultats 34
3.3 La minéralogie et ses outils d'analyse 36
3.3.1 La minéralogie 36
3.3.2 L'interprétation modale 38
3.3.3 Phases porteuses et degré de libération des contaminants inorganiques 41
3.4 Quantités requises pour les analyses et résultats 43
3.4.1 Quantités requises pour les analyses 43
3.4.2 Utilisation des résultats 44

Chapitre 4
Méthodes minéralurgiques applicables à la décontamination 49
4.1 Le tamisage 51
4.1.1 Principes 51
4.1.2 Les grizzlys 53
4.1.3 Les trommels 53
4.1.4 Les tamis vibrants 55
4.1.5 Les tamis giratoires 57
4.1.6 Conditions d'application 58
4.2 La classification 58
4.2.1 Principes 58
4.2.2 Le classificateur mécanique à vis 62
4.2.3 L'hydrocyclone 63
4.2.4 Le classificateur hydraulique (ou à lit fluidisé) 65
4.2.5 Conditions d'application 68
4.3 La concentration gravimétrique 68
4.3.1 Principes 68
4.3.2 Les séparateurs par milieu dense 72
4.3.3 Le cyclone et le séparateur tubulaire à milieu dense 74
4.3.4 Les jigs 77
4.3.5 Les spirales 78
4.3.6 Les tables à secousses 81
4.3.7 Le concentrateur Knelson 83
4.3.8 Le séparateur MGS Mozley 84
4.3.9 Conditions d'application 86
4.4 La flottation 87
4.4.1 Principes 87
4.4.2 Préparation de la pulpe et réactifs de flottation 90
4.4.3 Les cellules de flottation 95
4.4.4 Les colonnes de flottation 97
4.4.5 Concentration des contaminants organiques par flottation 99
4.4.6 Conditions d'application 101
4.5 La séparation magnétique 102
4.5.1 Principes 102

4.5.2 Le convoyeur à tête magnétique 105
4.5.3 Le séparateur humide à tambour 105
4.5.4 Conditions d'application 106
4.6 La séparation électrostatique 107
4.6.1 Principes 107
4.6.2 Conditions d'application 108

Chapitre 5
Sélection de la technologie appropriée 109
5.1 Exigences particulières aux différentes technologies 110
5.1.1 Concentration gravimétrique 110
5.1.2 Flottation 111
5.1.3 Séparation magnétique 111
5.1.4 Séparation électrostatique 112
5.1.5 Résumé des exigences 112
5.2 Contraintes relatives aux différentes matrices 113
5.2.1 Les sédiments 113
5.2.2 Les sols 113
5.2.3 Les boues 113
5.3 Stratégie d'élaboration d'un schéma de traitement 114
5.3.1 Sélection des équipements 115
5.3.2 Élaboration du schéma préliminaire de traitement 117
5.3.3 Validation et optimisation du schéma de traitement 118

Chapitre 6
Conclusions et recommandations 121

Références 124

Annexe A - Tableau des séries complètes des tamis 127
Annexe B - Tamiseuse à étages multiples (Ro-Tap) 129
Annexe C - Tamiseuse humide (Sweco) 131
Annexe D - Résultats typiques d'une analyse granulométrique avec le Microtrac 133

Liste des tableaux

2.1 Principales informations pertinentes à la description des conditions de prélèvement .. 8
3.1 Quelques méthodes d'analyse granulométrique 16
3.2 Tailles des tamis fréquemment employés avec les équivalents des séries américaine Tyler et standard ASTM 18
3.3 Exemple de présentation des résultats d'une analyse granulométrique 23
3.4 Exemple typique de regroupement en 5 fractions granulométriques 28
3.5 Exemple typique des 5 fractions granulométriques qui seront analysées 28
3.6 Liste des méthodes analytiques de dosage des contaminants inorganiques et organiques pour les sédiments 31
3.7 Liste des méthodes analytiques de dosage des contaminants inorganiques et organiques pour les sols 33
3.8 Quantités requises par fraction granulométrique pour l'analyse des contaminants organiques et inorganiques 34
3.9 Exemple typique de répartition granulométrique du cuivre sur les 5 fractions 34
3.10 Exemple typique des résultats d'analyses chimiques 39
3.11 Exemple typique d'une interprétation modale 40
3.12 Degré de polarité de certains minéraux 41
3.13 Quantité de matériel requises pour les différentes analyses 44
3.14 Les principes de fonctionnement des équipements minéralurgiques et leur conditions d'utilisation 46
4.1 Application typique des appareils de tamisage 58
4.2 Application typique des appareils de classification 68
4.3 Critère de concentration gravimétrique en fonction de la taille des particules 72
4.4 Application et capacité des appareils de concentration gravimétrique 86
4.5 Application et capacité des appareils de flottation 102
4.6 Application et capacité des appareils de séparation magnétique 106
5.1 Résumé des exigences particulières aux différentes technologies minéralurgiques 112

Liste des figures

1.1 Étapes du protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues par les technologies minéralurgiques 5
3.1 Séquence des étapes de la caractérisation par l'approche minéralurgique 14
3.2 Séparation d'un ensemble de particules en plusieurs fractions granulométriques 15
3.3 Procédure simplifiée de tamisage à sec 20
3.4 Procédure simplifiée de tamisage en présence d'une fraction appréciable de particules fines 21
3.5 Présentation graphique de résultats 23
3.6 Le cyclosizer 25
3.7 Procédure spéciale de tamisage humide 29
3.8 Répartition et teneur en cuivre en fonction des fractions granulométriques 35
3.9 Les différents états de libération 3
3.10 Degré de facilité à décontaminer en fonction de la grosseur des particules dans le cas où les contaminants inorganiques sont libres 45
4.1 La séparation physique accomplie par les procédés minéralurgiques 49
4.2 Courbe typique de la récupération en fonction de la teneur 50
4.3 Équipement de tamisage: grizzly vibrant 54
4.4 Équipement de tamisage: trommel 54
4.5 Équipements de tamisage: trommels en série 54
4.6 Tamis vibrant à plusieurs étages 56
4.7 Tamis giratoire 56
4.8 Comportements d'une particule solide située dans un champ d'attraction gravitationnelle 59
4.9 La sédimentation, l'élutriation et la fluidisation 61
4.10 Classificateur mécanique à vis 64
4.11 Principe de classification 64
4.12 Hydrocyclone 64
4.13 Classificateur hydraulique 67
4.14 Les mécanismes de séparation 70
4.15 Principe de la séparation par milieu dense 73
4.16 Séparateur conique à milieu dense 75
4.17 Séparateur tubulaire à milieu dense 76
4.18 Jig à grille fixe Denver 76
4.19 Vue d'ensemble et section d'une spirale 80
4.20 Localisation des particules en fonction de leur masse volumique 80
4.21 Vue en perspective d'une table à secousses 82
4.22 Progression de la stratification entre deux rainures 82
4.23 Répartition des produits récupérés en fonction de leur masse volumique 82
4.24 Concentrateur Knelson 85

4.25 Séparateur MGS Mozley 85
4.26 Fixation des particules à surface hydrophobe aux bulles d'air 88
4.27 Réservoir de conditionnement Denver 91
4.28 Cellule d'attrition 91
4.29 Mode d'action d'un collecteur 92
4.30 Mode d'action d'un moussant 93
4.31 Ajout des réactifs de flottation durant la préparation de la pulpe 94
4.32 Section transversale d'une cellule de flottation 96
4.33 Banc de cellules de flottation 96
4.34 Colonne de flottation 98
4.35 Entraînement des particules susceptibles de séparation magnétique 104
4.36 Séparateurs magnétiques humides à tambour 104
4.37 Séparateur électrodynamique 108
5.1 Les informations obtenues grâce à la caractérisation par l'approche minéralurgique d'un échantillon représentatif 114
5.2 Stratégie de sélection des équipements minéralurgiques 115
5.3 Schéma simplifiée de traitement 119

Glossaire

Attrition : opération visant à détacher les particules fines qui adhèrent aux grosses particules et à nettoyer les particules de la couche de contaminants qui les enrobe par friction des particules les unes contre les autres.

Classification : séparation d'un ensemble de particules en fonction de leur taille sur le principe des vitesses terminales de chute différentes dans un fluide.

Concentration gravimétrique : procédé minéralurgique qui exploite la différence de masse ou de masse volumique entre les matériaux afin d'effectuer une séparation.

Concentré : produit obtenu à la sortie d'un procédé minéralurgique comportant la portion enrichie (minéraux de valeur ou substances contaminantes).

Conductivité électrique : propriété des matériaux à conduire le courant électrique (substance conductrice par opposition à substance isolante).

Degré de libération : pourcentage d'un minéral donné présent en tant que particule libre dans un mélange.

Diffraction : déviation que subit la direction de propagation des ondes (lumineuses ou rayons X) lorsque celles-ci rencontrent un obstacle ou une ouverture dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que leur longueur d'onde (la diffraction des rayons X sert à identifier les minéraux).

Élutriation : séparation des particules à l'aide d'une courant fluide ascendant dont la vitesse est réglable (inverse de sédimentation).

Flottation : procédé minéralurgique qui exploite l'affinité des surfaces hydrophobes (naturelles ou stimulées) des particules pour les bulles d'air afin d'effectuer une séparation.

Fluidisation : mise en suspension de particules solides dans un courant fluide ascendant.

Gangue : substance stérile associée au minerai ou qui entoure une pierre précieuse dans un gisement. Il s'agit donc des minéraux indésirables dont la valeur est négligeable.

Granulométrie : mesure des dimensions des grains d'un mélange dont le résultat est présenté sous forme de répartition statistique (distribution).

Hydrométallurgie : ensemble des procédés d'extraction des métaux contenus dans un minerai brut ou un concentré par dissolution dans une phase aqueuse.

Interprétation modale : conciliation de la composition minéralogique et de la composition chimique d'un mélange afin de connaître les proportions probables de chaque minéral identifié.

Masse volumique : propriété propre à chaque substance qui désigne le quotient de la masse d'un corps par son volume (le terme "densité" peut être considéré comme synonyme).

Matrice : ensemble des solides de nature minérale et/ou végétale constituant la portion naturelle d'un échantillon et sur lesquels peuvent se fixer des substances contaminantes.

Minerai : élément de terrain contenant des minéraux utiles en proportion appréciable, et qui demandent un traitement pour être utilisés par l'industrie.

Minéralogie : branche de la géologie qui traite des minéraux, de leurs propriétés chimiques et physiques ainsi que de leur identification.

Minéralurgie : ensemble des procédés par lesquels un minerai brut extrait d'une mine est séparé afin de le débarrasser des minéraux indésirables dont la valeur est négligeable.

Minéraux : solides naturels homogènes, habituellement formé par des procédés inorganiques, dont la composition est définie et qui présentent un arrangement atomique ordonné.

Phase porteuse : forme sous laquelle un élément métallique (contaminant inorganique) se présente et qui se distingue généralement par différents états d'oxydation. Les phases porteuses sont identifiées visuellement par leur couleur, leur forme et leur texture à l'aide d'un microscope optique ou électronique.

Polarité : état particulier d'un système où l'on peut distinguer deux pôles (électriques ou magnétiques).

Propriété ferromagnétique : propriété de certaines substances (fer, cobalt, nickel) de prendre une forte aimantation.

Propriété hydrophile : propriété d'une surface à se laisser mouiller par l'eau sans dissolution.

Propriété hydrophobe : propriété d'une surface de ne pas se laisser mouiller par l'eau.

Pulpe : mélange solides/liquide dont la principale caractéristique est le pourcentage de solides qu'il contient.

Pyrométallurgie : ensemble des procédés d'extraction des métaux contenus dans un minerai brut ou un concentré par l'action de hautes températures.

Rejet : produit obtenu à la sortie d'un procédé minéralurgique comportant la portion appauvrie.

Séparation électrostatique : procédé minéralurgique qui exploite la différence de conductivité électrique entre les matériaux afin d'effectuer une séparation.

Séparation magnétique : procédé minéralurgique qui exploite les propriétés paramagnétiques et ferromagnétiques des matériaux afin d'effectuer une séparation (la séparation des matériaux paramagnétiques nécessite un champ magnétique fort tandis que la séparation des matériaux ferromagnétiques nécessite un champ magnétique faible).

Séparation par liquide lourd : séparation par sédimentation d'un mélange de particules solides de natures différentes à l'aide d'un liquide présentant une masse volumique intermédiaire à celles des minéraux à séparer.

Tamisage : opération visant à séparer un ensemble de particules en fonction de leur taille à l'aide d'un tamis.

Remerciements

Le présent document a été rédigé par Anne Gosselin (INRS-Géoressources) avec la collaboration de Denis Blackburn (Centre de Recherches Minérales, Ministère des ressources naturelles), sous la responsabilité de Monsieur Mario Bergeron (INRS-Géoressources).

Les auteurs souhaitent dans un premier temps remercier sincèrement Monsieur Jean-René Michaud de la Section Éco-Innovation technologique d'Environnement Canada qui a initié la préparation de ce document, fourni beaucoup de références pertinentes et qui a agit comme délégué scientifique du projet.

Ils remercient également le personnel professionnel et technique du Centre de Recherches Minérales qui ont contribué à la réalisation du présent document par leurs judicieux conseils. Il s'agit de Messieurs Jean-François Wilhelmy, Denis Cotnoir, Gennard Delisle, Arthur Plumpton et Bertrand Paquet.

Finalement, les auteurs remercient aussi le personnel professionnel et technique de l'INRS-Géoressources qui ont collaboré à la réalisation de ce document grâce aux informations pertinentes qu'ils ont fournies. Il s'agit de Messieurs Marc-Antoine Dion, Jean-Pierre Ricbourg et André Hébert.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

La minéralurgie est définie comme l'ensemble des procédés par lesquels un minerai brut extrait d'une mine est séparé afin de le débarrasser des minéraux indésirables dont la valeur est négligeable. Ces derniers sont communément désignés par le terme "gangue". La séparation en question qui peut être réalisée par des équipements de concentration gravimétrique, de flottation, de séparation magnétique et de séparation électrostatique a pour effet de concentrer le ou les minéraux d'intérêt afin de réduire le volume de matériel qui sera subséquemment traité par hydrométallurgie ou par pyrométallurgie.

L'approche minéralurgique pour des applications environnementales comme la décontamination des sédiments, des sols ou des boues est un domaine qui a déjà été utilisé et démontré dans plusieurs pays. Dans des applications environnementales, l'approche minéralurgique consiste dans les faits à considérer les matrices contaminées comme un minerai de faible teneur, d'où la nécessité d'identifier des technologies économiques et performantes.

Il s'agit d'une approche avantageuse car les procédés minéralurgiques reposent sur des principes physiques de séparation assez simples. D'une façon générale, les méthodes physiques sont parmi les moins dispendieuses à exploiter comparativement aux méthodes d'extraction ou de destruction biologiques, thermiques et chimiques. Outre leur simplicité et leur économie d'opération, comme ces technologies n'entraînent pas la formation de sous-produits potentiellement toxiques ou dangereux, elles présentent un grand intérêt au plan environnemental.

Dans des applications environnementales, il est essentiel de préciser que les technologies minéralurgiques sont utilisées afin d'extraire ou de concentrer les substances contaminantes. Les produits qui en résultent sont d'une part la matrice décontaminée et d'autre part un ou des concentrés de substances contaminantes dont le volume est relativement modeste par rapport au volume initial. Le ou les concentrés peuvent être traités, si valorisables, dans une fonderie ou dans un concentrateur à forfait, sinon détruits de façon biologique, thermique ou physico-chimique ou encore disposés dans des sites d'élimination autorisés. Il s'agit donc de technologies de pré-traitement.

Les technologies minéralurgiques offrent donc un potentiel remarquable pour extraire les contaminants des sols, des sédiments et des boues contaminés. Malheureusement, les méthodes actuelles de caractérisation et d'analyses granulométriques et chimiques nous renseignent très peu sur le potentiel et les limites de ces technologies quant au traitement ou à la valorisation possible des matrices contaminées.

1.2 Objectif du document

La protocole de caractérisation décrit dans le présent document vise à exposer un protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues par les technologies minéralurgiques qui a été développé récemment par l'INRS-Géoressources et le Centre de Recherches Minérales à l'occasion d'un projet de démonstration technologique réalisé en collaboration avec la Section Éco-innovation technologique d'Environnement Canada et la compagnie Verreault Navigation inc. (Bergeron et al., 1997). L'objectif du projet était de développer un schéma de traitement de sédiments contaminés reposant sur l'application de procédés minéralurgiques.

La rédaction du présent document a été financé conjointement par l'INRS-Géoressources, le Centre de Recherches Minérales et par la Section Éco-innovation technologique d'Environnement Canada.

Le projet relié au présent protocole s'inscrit dans les objectifs et les priorités de la Section Éco-innovation technologique d'Environnement Canada qui visent à développer des guides d'évaluation des technologies environnementales de façon à assister les promoteurs, les consultants, les universités, les centres de recherche et les gestionnaires dans la planification, la conception, l'évaluation et la réalisation de projets de décontamination.

De plus, Environnement Canada souhaite démontrer par la diffusion de cette approche, l'expertise, les capacités analytiques et les divers équipements disponibles auprès des universités et des centres de recherche québécois pour la réalisation de projets de caractérisation et d'essais de traitabilité des sols, sédiments, boues et autres déchets industriels et municipaux.

1.3 Présentation sommaire du protocole

Le protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues par les technologies minéralurgiques proposé s'inspire de celui ordinairement utilisé pour la caractérisation et l'analyse de la traitabilité des minerais. Il permet de localiser les contaminants dans les différentes tranches granulométriques et d'identifier la composition minéralogique ainsi que certaines propriétés physiques des particules (matrice et contaminants). Les informations obtenues grâce à la caractérisation par l'approche minéralurgique permettent dans un premier temps de confirmer l'applicabilité des technologies minéralurgiques. À la suite de la confirmation, elles permettent de sélectionner les équipements minéralurgiques appropriés afin d'élaborer un schéma préliminaire de traitement. Un tel schéma doit ensuite être validé et optimisé par des essais de traitement à l'échelle laboratoire et semi-industrielle. Le diagramme de la figure 1.1 énumère toutes ces étapes accompagnées des principales procédures à suivre pour leur réalisation.

1.4 Contenu du document

Après avoir rappelé le contexte, les objectifs et décrit sommairement l'approche présentée au premier chapitre, le deuxième chapitre fera un rappel des diverses procédures d'échantillonnage en fonction du type de matériel à prélever (sédiments, sols ou boues contaminées). Cependant, les techniques d'échantillonnage ne seront pas abordées de façon détaillée car il existe déjà une littérature abondante sur ce sujet.

La caractérisation par l'approche minéralurgique sera, pour sa part, décrite d'une façon beaucoup plus développée et fera l'objet de la matière abordée au troisième chapitre. Comme ce document s'adresse à un public très diversifié, les principaux équipements minéralurgiques seront ensuite décrits et illustrés dans le quatrième chapitre. En plus de décrire leur principe de fonctionnement, les conditions d'application et les performances de chaque équipement seront présentées.

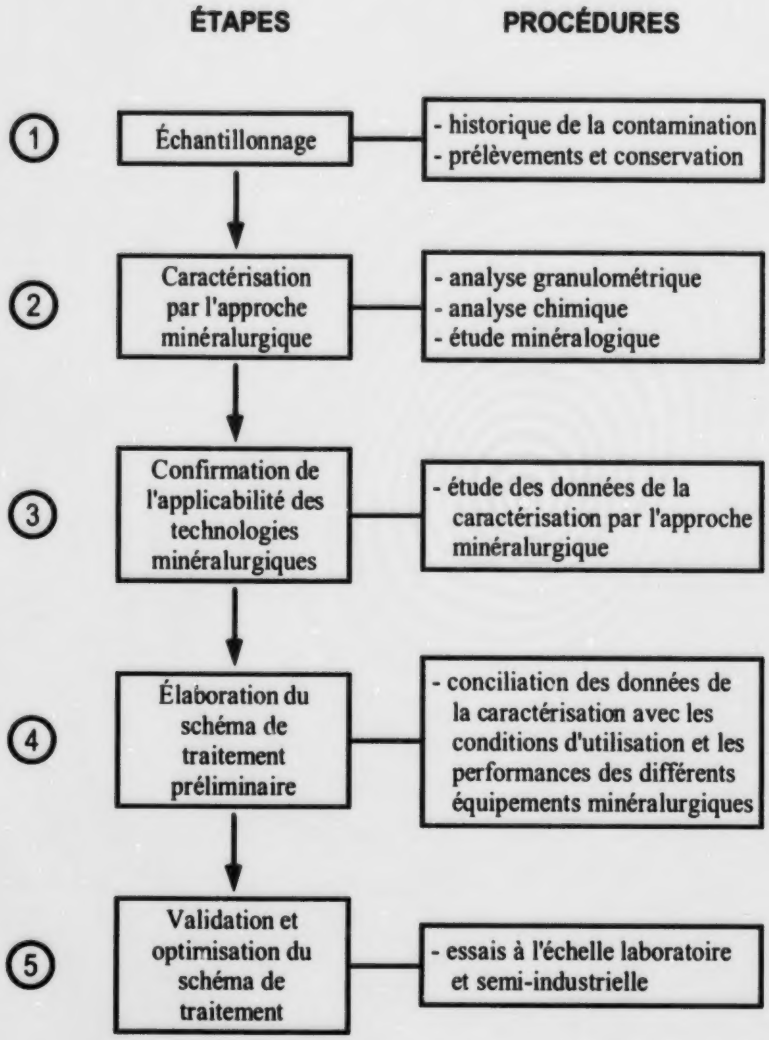


Figure 1.1 - Étapes du protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues par les technologies minéralurgiques

Le cinquième chapitre présentera la stratégie à suivre lors de la sélection des équipements en fonction des informations obtenues lors de la caractérisation minéralurgique. Finalement, les conclusions et recommandations seront exposées afin de compléter le document.

En résumé, l'approche minéralurgique présentée ici comporte deux volets : celui de la caractérisation et celui du traitement. La matrice contaminée est considérée comme un minerai et l'objectif est d'en extraire les substances contaminantes comme si elles étaient des minéraux de valeur. Conséquemment, le langage utilisé dans le présent document provient essentiellement du domaine minéralurgique (traitement de minerai). Il est passablement différent de celui utilisé dans le domaine de l'environnement et c'est pourquoi le glossaire devra être consulté occasionnellement afin de dissiper toute confusion possible.

Chapitre 2

Procédures d'échantillonnage

L'échantillonnage constitue une étape cruciale dans le processus de caractérisation d'un sédiment, d'un sol ou d'une boue. Le but visé est d'obtenir un éventail d'échantillons représentatifs qui reflète toutes les caractéristiques physiques et chimiques de l'ensemble du site étudié. Parallèlement, le nombre et le volume des échantillons doivent être restreints au minimum pour des raisons économiques. Il est donc important de parvenir à un compromis acceptable entre la représentativité et le budget disponible. Les principales étapes qui caractérisent une démarche d'échantillonnage sont l'élaboration d'une stratégie de prélèvement, le prélèvement des échantillons sur le site, la conservation des échantillons et leur préparation pour les fins d'analyses. La valeur des résultats de la caractérisation dépend de la réalisation adéquate de toutes ces étapes.

L'élaboration de la stratégie de prélèvement doit débuter par la définition des objectifs de l'exercice. Chaque site étant un cas unique, il est important de procéder à une étude spécifique

comportant plusieurs volets, soit l'historique du site, la caractérisation physique du milieu naturel environnant et l'identification des contraintes liées à l'exercice. La planification de toute campagne d'échantillonnage des sédiments, des sols et des boues doit en effet reposer au préalable sur une recherche bibliographique pour déterminer l'historique de la contamination.

La stratégie de prélèvement repose essentiellement sur le volume et le nombre des échantillons ainsi que sur le choix des stations d'échantillonnage (nombre, emplacement et positionnement). La représentativité des échantillons dépend en grande partie des choix qui sont effectués.

Le choix de l'équipement utilisé pour prélever les échantillons est principalement effectué en fonction du type d'échantillon (sol, sédiment ou boue), du volume requis et de la localisation du site. Lors du prélèvement, les conditions de prélèvement doivent être notées. Les principales informations pertinentes sont présentées au tableau 2.1.

Tableau 2.1 - Principales informations pertinentes à la description des conditions de prélèvement (source: Ministère de l'Environnement et de la Faune, 1994)

Type d'informations	Paramètres
Identification de l'échantillon:	numéro de l'échantillon, localisation du prélèvement, heure et date du prélèvement, fréquence,...
Mesures sur place:	pH, température, . . .
conditions climatiques:	pluie, neige, . . .
Méthode d'échantillonnage:	description de la méthode, principaux équipements, contenants, agents de conservation, ...
Description visuelle des échantillons et du milieu échantillonné:	couleur, odeur, turbidité visuelle, . . .

À la suite du prélèvement, certaines conditions de conservation des échantillons pour le transport et l'entreposage doivent être respectées. Ces conditions concernent essentiellement la température à laquelle doit être maintenue les échantillons ainsi que le type de contenants dans lesquels ils doivent être conservés. Il est important de préserver les échantillons contre toutes les formes de dégradation possibles (biologique, chimique, physique, thermique, rayons ultraviolets, etc).

Les différentes analyses impliquées dans la caractérisation nécessitent fréquemment une préparation des échantillons. La procédure de préparation peut impliquer plusieurs opérations comme l'homogénéisation, le tamisage, le séchage, le broyage, la calcination, la dissolution ou l'extraction. Les opérations requissent doivent donc être effectuées de façon à préserver l'intégrité des échantillons (Environnement Canada, 1994).

Les procédures d'échantillonnage dirent en fonction du type de matériel à prélever (sédiment, sol ou boue). Les sections qui suivent présentent certaines caractéristiques spécifiques à chaque type de matériel qui doivent être prises en considération lors de l'échantillonnage. Cependant, les procédures d'échantillonnage ne sont pas détaillées dans le présent document car elles font déjà l'objet d'une littérature abondante. Des documents de référence relatifs aux procédures d'échantillonnage sont proposés pour chaque cas.

Finalement, il est essentiel de souligner que le caractère significatif de la caractérisation dépend entièrement de la procédure d'échantillonnage qui précède. Les résultats de la caractérisation sont inutiles quand la représentativité des échantillons analyses est déficiente. Par contre, il est possible que les budgets disponibles soient restreints à un point tel que le nombre d'échantillons doit être réduit au minimum, entraînant ainsi une diminution de la représentativité.

Dans de telles situations, il peut être avantageux de changer l'orientation de l'exercice d'échantillonnage en prélevant un petit nombre d'échantillons dans la zone identifiée comme étant la plus contaminée. En conséquence, l'échantillonnage ne sera pas représentatif de l'ensemble du site mais sera plutôt représentatif du pire cas qui pourra être rencontré. Les équipements minéralurgiques qui ont été jugés applicables pour le pire cas seront applicables par la suite à l'ensemble du site. Cette assertion peut être qualifiée de la "règle du pire".

2.1 Échantillonnage des sédiments

2.1.1 Caractéristiques spécifiques

La granulométrie des sédiments couvre un large intervalle dont une forte proportion se situe dans les fractions très fines qui définissent les argiles (4 p.m). La teneur en eau d'un sédiment augmente avec la finesse des particules. Il est donc important d'ajuster le volume des échantillons en fonction de ce paramètre afin de récolter une quantité suffisante de solides.

En regard de la profondeur des plans d'eau, l'accessibilité des sédiments peut constituer un problème. En effet, les fonds océaniques se situent normalement à une profondeur beaucoup plus considérable que les fonds lacustres. À de telles profondeurs, la visibilité peut être très réduite, sinon nulle. De plus, le positionnement des stations d'échantillonnage sur les plans d'eau est plus problématique que sur la terre ferme. Les variations saisonnières des conditions climatiques doivent aussi être prises en considération. La formation d'épaisses couches de glace en hiver peut aussi restreindre l'accessibilité des sédiments (Environnement Canada, 1994).

2.1.2 Documents de référence

Il existe quelques documents de référence sur l'échantillonnage des sédiments. L'un d'eux a été réalisé par R. Rochon et M. Chevalier (1987) et il s'intitule "Échantillonnage et conservation des sédiments en vue de la réalisation des projets de dragage". Un autre a été réalisé par le Conseil canadien des ministres de l'environnement (1993). Il s'agit du document intitulé "Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés". Ce document est divisé en deux volumes, soit le volume I qui comporte le rapport principal et le volume II qui présente les sommaires des méthodes d'analyse. Un dernier document de référence sur le sujet en question a été réalisé

par Environnement Canada (1994). Il s'intitule "Document d'orientation sur le prélèvement et la préparation de sédiments en vue de leur caractérisation physico-chimique et d'essais biologiques" (rapport SPE 1/RM/Z9).

2.2 Échantillonnage des sols

2.2.1 Caractéristiques spécifiques

Les sols sont caractérisés par leur grande variabilité géologique d'un site à l'autre mais aussi sur un même site, ce qui leur confère une nature hautement hétérogène. Cette variabilité est le résultat des nombreux processus et bouleversements qui ont mené à la formation des sols. Les sols sont composés de diverses couches, chacune présentant des propriétés différentes. Ils présentent donc des variations de composition selon la direction verticale. De plus, des variations de composition selon la direction horizontale peuvent se présenter en raison de la topographie du terrain. Les caractéristiques des sols peuvent également varier en fonction du type de végétation qui s'y trouve (Conseil canadien des ministres en environnement, 1993). La présence de cours d'eau à proximité ainsi que la hauteur de la nappe phréatique doivent aussi être considérées.

2.2.2 Documents de référence

Il existe plusieurs documents de référence sur l'échantillonnage des sols. L'un d'eux a été réalisé par le Conseil canadien des ministres de l'environnement (1993). Il s'agit du document intitulé "Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés". Ce document est divisé en deux volumes, soit le volume I qui comporte le rapport principal et le volume II qui présente les sommaires des méthodes d'analyse. D'autres informations pertinentes sont présentées dans le "Guide standard de caractérisation de terrains contaminés" et dans "Conservation et analyse des échantillons d'eau et de sol" qui ont été réalisés par le Ministère de l'environnement et de la faune (1996).

2.3 Échantillonnage des boues

2.3.1 Caractéristiques spécifiques

Les caractéristiques des boues varient en fonction de leur provenance. Les boues d'origine municipale proviennent principalement des effluents de stations d'épuration d'eaux usées. Elles se distinguent par une forte charge organique ainsi que par la présence de particules colloïdales. La composition des boues d'origine industrielle peut varier considérablement d'un secteur d'activité à l'autre. Les principales caractéristiques des boues industrielles sont leur variabilité et leur nature hautement hétérogène. Des variations sont susceptibles de se produire au niveau de la composition chimique, de la température, de la granulométrie et de la teneur en eau. Les boues d'origine industrielle présentent dans la plupart des cas des concentrations de substances contaminantes beaucoup plus élevées que les boues d'origine municipale.

2.3.2 Documents de référence

Il existe peu de documents de référence sur l'échantillonnage des lagunes de boues. L'un d'eux a été réalisé par l'Agence de Protection Environnementale des États-Unis (U.S. EPA, 1986). Il s'agit du document intitulé "Test Method for Evaluating Solid Waste" (volume IIa, SW846, 3ième édition, partie III, chapitre 9). Un autre document pertinent a été réalisé par Keith (199 l), il s'intitule "Environmental Sampling and Analysis: A Practical Guide".

Finalement, le document intitulé "Analyse des boues - Tome 1: Généralités et analyse physique" propose certaines mesures à suivre pour l'échantillonnage des boues (comme le nombre de prélèvements en fonction du volume de boues). Ce dernier a été réalisé par l'Association française pour l'étude des eaux (1985).

Chapitre 3

Caractérisation par l'approche minéralurgique

La caractérisation conventionnelle des sédiments, des sols et des boues repose généralement sur l'analyse de plusieurs paramètres chimiques et physiques. Pour sa part, la caractérisation par l'approche minéralurgique repose principalement sur la distribution des contaminants dans les différentes fractions granulométriques, sur l'identification de leur composition minéralogique (contaminants inorganiques) et l'évaluation de leur degré de libération (contaminants inorganiques). Ces outils de caractérisation seront détaillés dans le présent chapitre. Un outil complémentaire et très particulier pour la caractérisation des matériaux visés sera décrit : il s'agit de l'interprétation modale. Finalement, il sera question des essais de laboratoire visant à obtenir des fractions où sont concentrés les contaminants.

Après avoir acquis l'assurance que les échantillons prélevés pour la caractérisation sont représentatifs, trois étapes majeures jalonnent la caractérisation par l'approche minéralurgique.

La figure 3.1 expose ces étapes accompagnées des procédures à accomplir et des objectifs visés. L'ordre dans lequel sont présentées les étapes ainsi que les procédures reproduit la séquence à suivre. Les étapes présentées dans cette figure sont toutes décrites en détail dans les sections qui suivent.

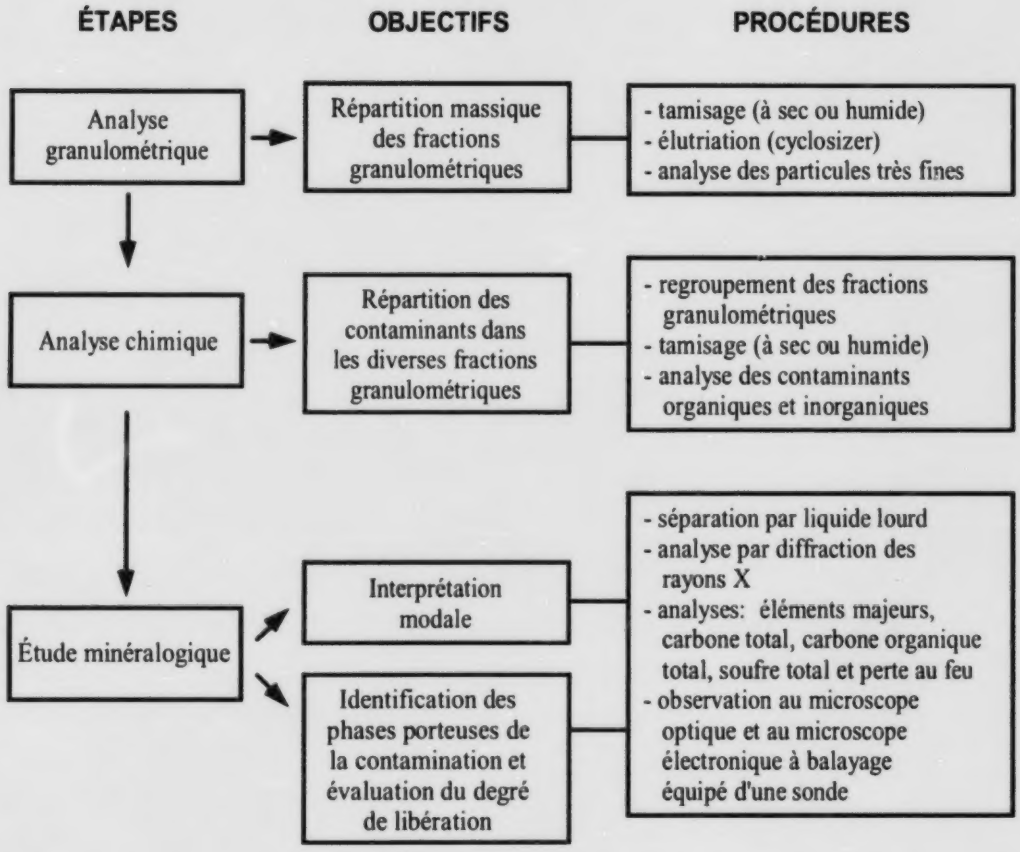


Figure 3.1 - Séquence des étapes de la caractérisation par l'approche minéralurgique

3.1 Analyse granulométrique

3.1.1 Définition et but de l'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est définie comme étant la séparation d'un ensemble de particules en fonction de leur grosseur afin d'obtenir des ensembles de particules appelés fractions granulométriques (figure 3.2). Ces fractions sont constituées de particules dont la grosseur couvre un intervalle relativement restreint et diminue d'une fraction à l'autre.

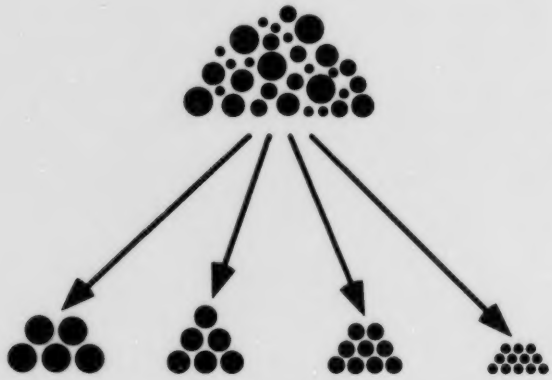


Figure 3.2 - Séparation d'un ensemble de particules en plusieurs fractions granulométriques

Ce type d'analyse vise habituellement à évaluer l'efficacité d'un équipement de tamisage ou les performances d'un système de concassage et/ou de broyage. L'analyse granulométrique appliquée dans un contexte environnemental est indispensable pour localiser les substances qui contaminent les sédiments, les sols et les boues. Elle sert à déterminer si elles sont situées dans les fractions fines, moyennes ou grossières. Le schéma de traitement par l'approche minéralurgique sera ensuite élaboré à partir de ces données.

La grosseur d'une particule sphérique peut être définie par une seule dimension, le diamètre, et celle d'une particule cubique par la longueur d'un côté. Cependant, les particules constituant les sédiments, les sols et les boues sont généralement de formes irrégulières et leur grosseur ne peut être définie avec précision. C'est pourquoi l'expression "diamètre équivalent" est utilisée. Ce terme est défini comme le diamètre d'une sphère qui aurait le même comportement qu'une particule de forme irrégulière soumise à une opération spécifique telle que le tamisage ou la centrifugation.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse granulométrique. Le tableau 3.1 en présente quelques-unes en fonction des diamètres de particules auxquelles elles s'appliquent.

Tableau 3.1 - Quelques méthodes d'analyse granulométrique

Méthode	Intervalle d'applicabilité (µm)
Tamisage	100 000 à 10
Élutriation	40 à 5
Microscopie optique	50 à 0,25
Sédimentation (gravité)	40 à 1
Sédimentation (centrifugation)	5 à 0,05
Microscopie électronique	1 à 0,005

Extrait de Wills (1988).

Parmi ces méthodes, seules les méthodes de tamisage et d'élutriation seront abordées dans le présent ouvrage puisqu'elles couvrent la presque totalité des gammes de grosseurs de particules visées. De plus, elles permettent la récupération d'échantillons séparés en fonction de la taille des particules. Pour l'analyse de particules très fines, il sera question d'un appareil relativement sophistiqué dont le mode de fonctionnement est basé sur la diffraction des rayons lumineux traversant une suspension de particules. Cependant, le traitement des particules dont le diamètre

est inférieur au micromètre est presque impossible par les méthodes minéralurgiques conventionnelles dont il sera question subséquemment.

3.1.2 Les tamis

Il existe deux sortes de tamis de laboratoire; ceux qui sont constitués d'un grillage fait de fils d'acier tissés avec des ouvertures carrées, les plus fréquemment employés, et ceux qui sont constitués d'une plaque d'acier perforée avec des ouvertures rondes. Les surfaces de tamisage sont fixées sur un support cylindrique permettant d'empiler les tamis les uns sur les autres. La principale dimension qui caractérise les tamis est la largeur des ouvertures.

Parmi les séries de tamis les plus courantes, on note la série américaine de Tyler et la série standard ASTM (American Society for Testing and Materials). Les deux séries suivent la même progression géométrique selon un rapport de 1,189 (racine quatrième de deux) d'un tamis à l'autre. Cependant, la série standard ASTM désigne la dimension des ouvertures tandis que la série américaine Tyler désigne le nombre d'ouvertures carrées par pouce. Quoique très utilisée, cette dernière série comporte un désavantage sérieux car la taille des ouvertures varie avec l'épaisseur des fils d'acier utilisés dans la conception des tamis.

Le tableau 3.2 présente ces deux séries en fonction de la taille nominale des ouvertures pour la gamme de tamis les plus fréquemment utilisés (voir Annexe A pour l'ensemble des séries complètes).

Les tamis utilisés pour effectuer l'analyse granulométrique doivent être sélectionnés en fonction du matériel à analyser et de la disponibilité des différentes tailles de tamis. Finalement, il est important de spécifier que la capacité maximale pour la moyenne des tamis est de 0,62 gramme de solides par centimètre carré de surface de tamisage.

Tableau 3.2 - Tailles des tamis fréquemment employés avec les équivalents des séries américaine Tyler et standard ASTM

Ouverture nominale	Série américaine Tyler (mailles)	Série standard ASTM
2 360 µm	8	2,36 mm
1 700 µm	10	1,70 mm
1 180 µm	14	1,18 mm
850 µm	20	850 µm
600 µm	28	600 µm
425 µm	35	425 µm
300 µm	48	300 µm
212 µm	65	212 µm
150 µm	100	150 µm
106 µm	150	106 µm
75 µm	200	75 µm
53 µm	270	53 µm
45 µm	325	45 µm
38 µm	400	38 µm

3.1.3 Préparation des échantillons

Les échantillons qui subiront l'analyse granulométrique doivent être homogènes et exempts de toute agglomération et gros débris. Ces derniers sont préalablement retirés par tamisage à l'aide d'un tamis très grossier comme par exemple un tamis 8 ou 10 mailles car cette fraction est généralement peu contaminée. Les particules fines ont tendance à former des agrégats indésirables qui auront pour conséquence de classer des particules fines dans des fractions plus grossières lors du tamisage. Ce

phénomène est attribué à une diminution de la tension de surface qui se développe lorsque l'échantillon est légèrement humide. Il peut aussi être attribué à l'attraction électrostatique lorsque l'échantillon est entièrement sec.

Les sédiments, les sols et les boues contiennent fréquemment une fraction appréciable de particules fines. Dans le but d'éviter la formation d'agrégats, il est préférable de procéder au tamisage humide du matériel tel quel sur le tamis le plus fin (généralement 325 ou 400 mailles) à l'aide d'un jet d'eau tel que décrit à la section suivante. Il peut parfois s'avérer utile d'ajouter des agents mouillants ou dispersants dépendant des propriétés du matériel (ces agents devront probablement être utilisés dans le procédé développé). Dans ces cas, il faut prendre soin de bien agiter le mélange avant de tamiser. Les échantillons de sol devront d'abord être délayés dans l'eau avant l'ajout des agents, ce qui n'est généralement pas le cas pour les sédiments et les boues dont le contenu en eau est plus élevé.

Pour les échantillons dont la fraction de particules fines est négligeable, l'échantillon est séché au four à 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant avant le tamisage à sec. Le séchage entraîne parfois la formation d'agglomérats et il s'avère alors utile de procéder à une désagrégation du matériel avant de tamiser. Il suffit de déposer le matériel séché sur un tamis 28 ou 35 mailles et de briser les agglomérats à l'aide d'un ustensile en caoutchouc comme un bouchon ou une spatule. Le matériel est récupéré dans un récipient qui a été préalablement installée sous le tamis.

3.1.4 Méthodes de tamisage

Lors d'un essai de tamisage à sec conventionnel, la série de tamis sélectionnés est empilée verticalement selon une taille des ouvertures de tamis qui décroît de haut en bas. Le tamis le plus grossier est sur le dessus de la pile et celui le plus fin est en-dessous. L'échantillon sec pesant entre 200 et 300 grammes est introduit sur le tamis

du haut et la pile entière est soumise à un mouvement de secousses horizontales et verticales grâce à un appareil de tamisage spécialement conçu à cette fin (voir annexe B). La figure 3.3 illustre de façon simplifiée la procédure de tamisage à sec.

Durant le tamisage, le matériel trop fin pour être retenu par un tamis donné tombe successivement sur les suivants jusqu'à ce qu'il soit retenu par un tamis dont les ouvertures sont légèrement plus petites que le taille des particules. Toutes les

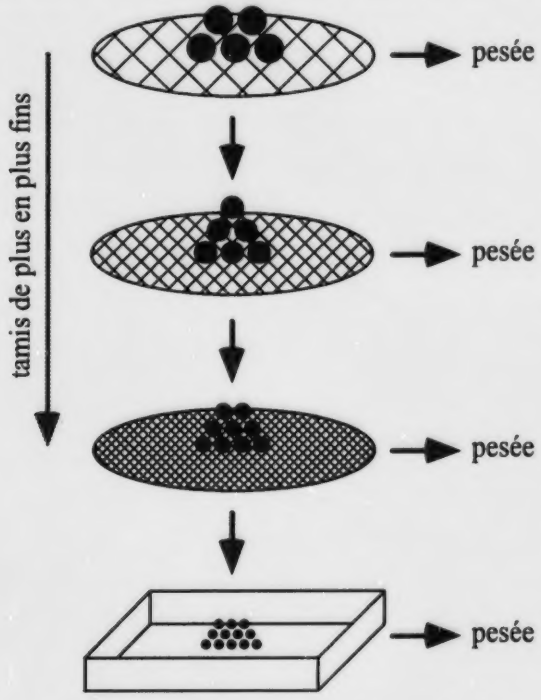


Figure 3.3 - Procédure simplifiée de tamisage à sec

fractions retenues sur les différents tamis ainsi que celle recueillie dans le bas de la pile doivent être pesées séparément. Il s'agit là de la procédure conventionnelle utilisée dans l'industrie minière.

Tel que mentionné précédemment, le matériel à analyser peut présenter une fraction importante de particules fines et il est alors essentiel d'effectuer une étape

préliminaire de tamisage humide sur le tamis le plus fin (généralement 325 ou 400 mailles). La procédure à accomplir est illustrée à la figure 3.4.

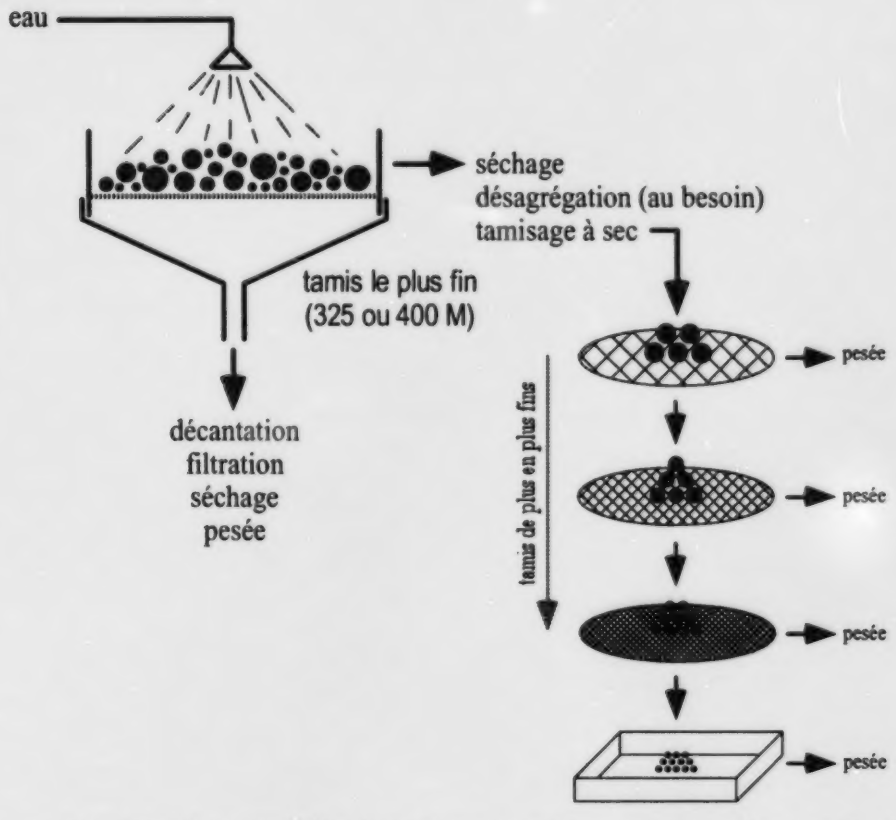


Figure 3.4 - Procédure simplifiée de tamisage en présence d'une fraction appréciable de particules fines

Dans un premier temps, un échantillon contenant entre 200 et 300 grammes de solides est déposé sur le tamis le plus fin de la série sélectionnée pour l'analyse (généralement 325 ou 400 mailles). Les particules fines qui ne sont pas retenues par le maillage du tamis sont lavées par un jet d'eau et récupérées dans un récipient sous le tamis. Cette étape peut être effectuer à l'aide d'un montage fait sur place ou à l'aide d'un équipement spécialement conçu à cet effet (voir annexe C). Le mélange particules fines/eau est laissé à reposer pour une période d'au moins 16 heures puis l'excès d'eau est retiré par décantation. L'ajout d'un agent floculant peut s'avérer

nécessaire lorsque la présence d'une grande quantité de particules très fines entraîne des temps de sédimentation inacceptablement trop longs. Par la suite, la partie sédimentée est récupérée pour être analysée par élutriation (voir section suivante: cyclosizer) ou pour être filtrée sous pression sur un papier filtre approprié. La rétention (diamètre moyen des ouvertures) de ce dernier doit être sélectionnée en fonction du diamètre des plus petites particules présentes. Le gâteau de filtration obtenu est ensuite séché au four à 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant et pesé.

La portion de l'échantillon retenue sur le tamis est séchée au four à 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Tel que mentionné précédemment, le séchage entraîne parfois la formation d'agglomérats et il s'avère alors utile de procéder à une désagrégation du matériel avant de tamiser. Il suffit de déposer le matériel séché sur un tamis 28 ou 35 mailles et de briser les agglomérats à l'aide d'un ustensile en caoutchouc comme un bouchon ou une spatule. Le matériel récupéré peut alors subir la procédure de tamisage à sec telle qu'illustrée à la figure 3.3. L'empilement de tamis utilisé doit inclure à son bas un tamis fin de même taille que celui utilisé pour le lavage des particules fines soit un tamis 325 ou 400 mailles. Cette procédure constitue la procédure standard utilisée dans l'industrie minière lorsqu'il y a une présence importante de particules fines.

3.1.5 Traitement des résultats

Les résultats du tamisage peuvent être compilés de trois différentes façons: a) en calculant le pourcentage massique de chaque fraction, b) en calculant le pourcentage cumulatif retenu sur chaque tamis et c) en calculant le pourcentage cumulatif passant chaque tamis. Un exemple typique est présenté au tableau 3.3.

Tableau 3.3 - Exemple de présentation des résultats d'une analyse granulométrique

Fraction (µm)	Masse (g)	Pourcentage massique (%)	Cumulatif retenu (%)	Cumulatif passant (%)
+1180	43,1	14,3	14,3	85,7
-1180 +600	9,3	3,1	17,4	82,6
-600 +425	63,8	21,2	38,6	61,4
-425 +300	40,0	13,3	51,9	48,1
-300 +212	25,2	8,4	60,3	39,7
-212 +150	26,9	8,9	69,2	30,8
-150 +106	28,1	9,3	78,5	21,5
-106 +75	14,2	4,7	83,2	16,8
-75 +53	18,0	6,0	89,2	10,8
-53 +45	6,5	2,2	91,4	8,6
-45 +38	5,0	1,7	93,1	6,9
-38	20,8	6,9	100,0	-

Il peut aussi être intéressant de présenter graphiquement les résultats d'un essai de tamisage afin de visualiser facilement les fractions granulométriques les plus importantes. Une des façons couramment employées est illustrée à la figure 3.5.

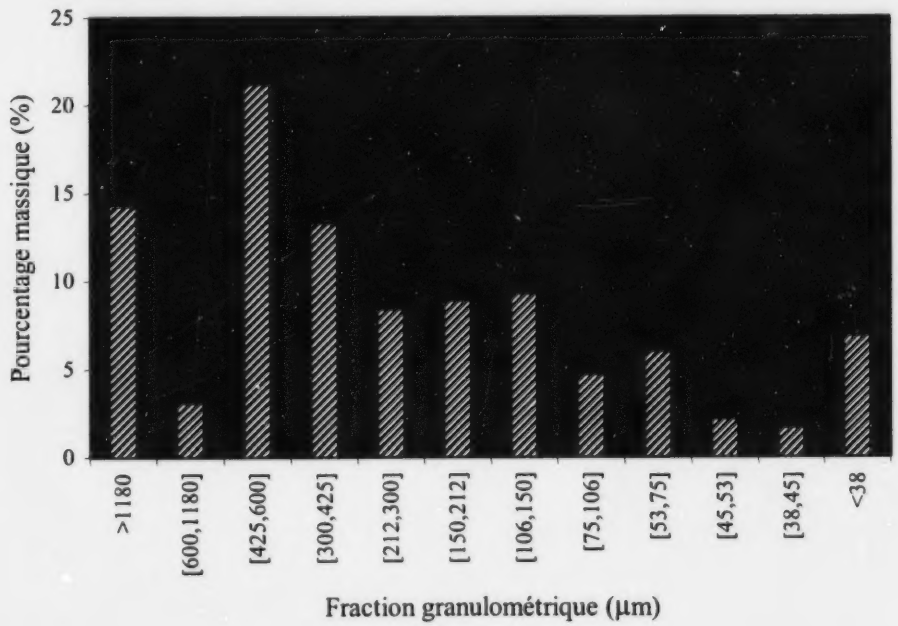


Figure 3.5 - Présentation graphique de résultats

3.1.6 Élutriation

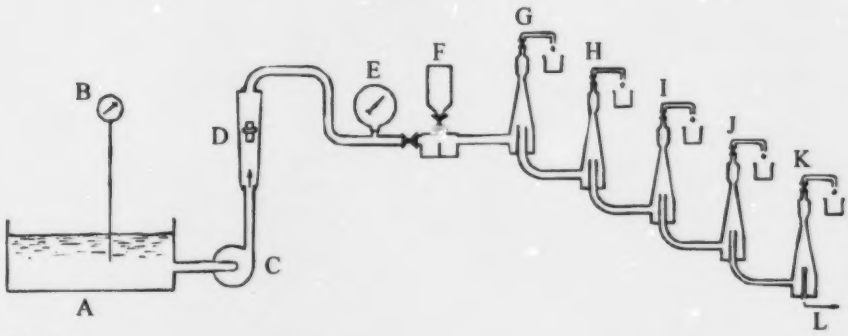
L'élutriation est le procédé inverse de la sédimentation. Un grain de sable qui tombe dans un verre d'eau stagnante verra sa vitesse augmenter grâce à la gravité jusqu'à une valeur constante, la vitesse terminale de chute, avant de se déposer au fond si la profondeur d'eau est suffisante. Il s'agit là de la sédimentation. Pour sa part, l'élutriation est basée sur le comportement d'une particule dans un courant fluide ascendant.

Les deux phénomènes dépendent de la vitesse terminale de chute spécifique à chaque particule évoluant dans un milieu fluide. Elle varie en fonction du diamètre de la particule, de la viscosité du fluide et des masses volumique de la particule et du fluide. Lors de l'analyse granulométrique, la viscosité et la masse volumique du liquide sont constantes. Ce sont la masse volumique et le diamètre des particules qui influencent la vitesse terminale de chute.

Durant le processus d'élutriation, les particules de différents diamètres sont séparées par le phénomène suivant. Les particules ayant une vitesse terminale de chute inférieure à la vitesse du courant ascendant de fluide sont emportées par ce dernier, tandis que celles ayant une vitesse terminale de chute supérieure se déposent au fond. Le temps de séparation augmente quand le diamètre des particules décroît. Pour les particules fines, l'utilisation de la force centrifuge contribue grandement à diminuer les temps de séparation.

Le cyclosizer est l'appareil le plus utilisé pour séparer les fractions granulométriques de diamètre plus petit que 40 µm. Comme il est possible de le constater à la figure 3.6, il est constitué de cinq hydrocyclones en série (voir au chapitre suivant pour la description complète de l'hydrocyclone). En variant la pression d'opération et le diamètre des entrées et des sorties, il est possible de d'augmenter la vitesse du fluide et la force centrifuge pour séparer successivement des particules de diamètres de plus

en plus petits. Ces valeurs de diamètres sont spécifiées par le fabricant pour chaque hydrocyclone en fonction de la masse volumique du solide. La masse volumique des différents solides présents dans les échantillons hétérogènes comme des sédiments, des sols ou des boues varie de façon appréciable. En conséquence, la séparation des particules sera effectuée en fonction de deux paramètres combinés: le diamètre et la masse volumique des particules. Pour un mélange de particules de quartz et de plomb, les particules de plomb (masse volumique de 11,3 g/cm^3) ayant un diamètre de 50 µm ont le même comportement que des particules de quartz (masse volumique de 2,6 g/cm^3) ayant un diamètre de 81,6 µm puisque leur masse respective est la même, soit 7,4 x 10^{-7} gramme.



Légende

A: réservoir d'eau	E: manomètre	I: hydrocyclone no.3
B: thermomètre	F: cylindre d'alimentation	J: hydrocyclone no.4
C: pompe	G: hydrocyclone no.1	K: hydrocyclone no.5
D: débitmètre	H: hydrocyclone no.2	L: rejet

Figure 3.6 - Le cyclosizer

Ce type d'appareil est utilisé lorsque la fraction de particules très fines est importante. L'échantillon qui est introduit dans le cylindre d'alimentation est constitué du mélange particules fines/eau décanté qui est obtenu lors du lavage sur tamis très fins (325 ou 400 mailles). La procédure d'élutriation doit être accomplie selon les indications du fabricant de l'appareil. Finalement, les fractions recueillies à chaque hydrocyclone sont séchées au four à 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids

constant et pesées. Les résultats peuvent être présentés sous forme de tableau ou de graphique comme ceux obtenus par la procédure de tamisage.

3.1.7 Analyse de particules très fines

L'analyse de la grosseur des particules très fines est réalisable depuis peu par l'utilisation de lasers. Les appareils conçus à cette fin exploitent la diffraction des rayons lumineux par les particules en question. La diffraction est définie comme étant la déviation que subit la direction de propagation des ondes lumineuses lorsque celles-ci rencontrent un obstacle de dimensions du même ordre de grandeur que leur longueur d'onde.

L'échantillon à analyser consiste en une suspension dans un liquide (généralement de l'eau) issue d'une fraction de particules fines obtenue par tamisage ou élutriation et circulant de façon continue au travers une cellule de verre. Un faisceau laser parallèle de faible énergie éclaire la cellule de verre et les rayons qui la traversent sont concentrés vers un détecteur électronique par un système optique convergent. Les valeurs d'illumination lues par le détecteur avec et sans échantillon sont traitées à l'aide d'un algorithme qui calcule les résultats sous forme de pourcentages cumulatifs de particules plus petites que certains diamètres pré-définis. Par cette méthode, il est possible de mesurer des particules dont le diamètre est aussi petit que 0,1 µm.

Les appareils conçus à cette fin qui sont disponibles sur le marché sont simples d'utilisation et produisent des résultats reproductibles très rapidement. Par contre, ils sont très dispendieux. Parmi les différents modèles disponibles, on note le Microtrac® (Leeds &Northrup Instruments) et l'Analysette 22® (Fritsch GmbH). Des résultats typiques d'une analyse effectuée avec le Microtrac sont présentés à l'annexe D.

Pour terminer, il est important de souligner la différence entre le tamisage ou l'élutriation et cette méthode d'analyse. Le tamisage et l'élutriation fournissent des résultats d'analyse granulométrique en séparant l'échantillon en différentes fractions de dimensions connues qui peuvent être ultérieurement analysées afin d'en connaître la teneur en contaminants organiques et inorganiques ainsi que d'autres propriétés concernant la caractérisation. La méthode d'analyse par utilisation de l'appareil à faisceau laser produit uniquement des résultats d'analyse granulométrique sans séparer l'échantillon analysé en fractions.

3.2 Localisation des contaminants organiques et inorganiques

3.2.1 Analyses par fractions granulométriques et totale

Les résultats de l'analyse granulométrique doivent être examinés attentivement afin d'identifier les fractions les plus importantes. Les petites fractions peuvent être combinées aux fractions adjacentes afin de constituer au total 4 à 6 fractions de masses approximativement égales. Le choix de la quantité de fractions qui seront analysées ultérieurement est tributaire des budgets disponibles car si les coûts reliés à une simple analyse granulométrique sont faibles ceux reliés aux analyses chimiques sont relativement élevés. Le tableau 3.4 expose un exemple du groupement en 5 fractions granulométriques qu'il est possible d'effectuer en étudiant les résultats d'une analyse granulométrique. Comme la masse totale de l'échantillon est de 300,9 grammes, chaque regroupement doit représenter une masse d'environ 60 grammes (300,9 g divisé par 5). La fraction entre 425 et 600 µm n'est pas combinée avec une autre puisque sa masse est de 63,8 grammes. Par contre, il a regroupement de fractions adjacentes en fonction de l'addition des masses. Le résultat final de cette opération est présenté au tableau 3.5.

Tableau 3.4 - Exemple typique de regroupement en 5 fractions granulométriques

Fraction (µm)	Masse (g)	Masse des regroupements (g)
+1180	43,1	
-1180 +600	9,3	52,4
-600 +425	63,8	63,8
-425 +300	40,0	
-300 +212	25,2	65,2
-212 +150	26,9	
-150 +106	28,1	
-106 +75	14,2	69,2
-75 +53	18,0	
-53 +45	6,5	
-45 +38	5,0	
-38	20,8	50,3

Tableau 3.5 - Exemple typique des 5 fractions granulométriques qui seront analysées

Fraction (µm)	Masse (g)	Pourcentage massique (%)
+600	52,4	17,4
-600 +425	63,8	21,2
-425 +212	65,2	21,7
-212 +75	69,2	22,9
-75	50,3	16,8

Avant de procéder à l'analyse des différents contaminants organiques et inorganiques, il faut donc effectuer la séparation d'une portion de matériel par tamisage conventionnel (deux méthodes décrites à la section 3.1.4) ou par élutriation (section 3.1.5) afin d'obtenir les fractions granulométriques désirées. Les analyses des contaminants seront effectuées pour chaque fraction sélectionnée ainsi que sur un échantillon n'ayant subi aucune séparation. Cette dernière précaution a pour but de vérifier le bilan massique de répartition des contaminants sur les différentes fractions.

Une procédure spéciale de tamisage humide doit être appliquée pour les cas où l'analyse des paramètres suivants est requise:

- mercure,
- cyanures,
- tous les paramètres organiques.

En effet, les composés mentionnés ci-haut sont volatils et les échantillons ne doivent donc pas subir une quelconque procédure de séchage. La procédure de tamisage humide prescrite pour cette circonstance est illustrée à la figure 3.7. Il est important de remarquer que les tamis sélectionnés pour cette procédure sont utilisés dans un ordre croissant en commençant par le tamis le plus fin pour terminer par le tamis le plus grossier de la série choisie.

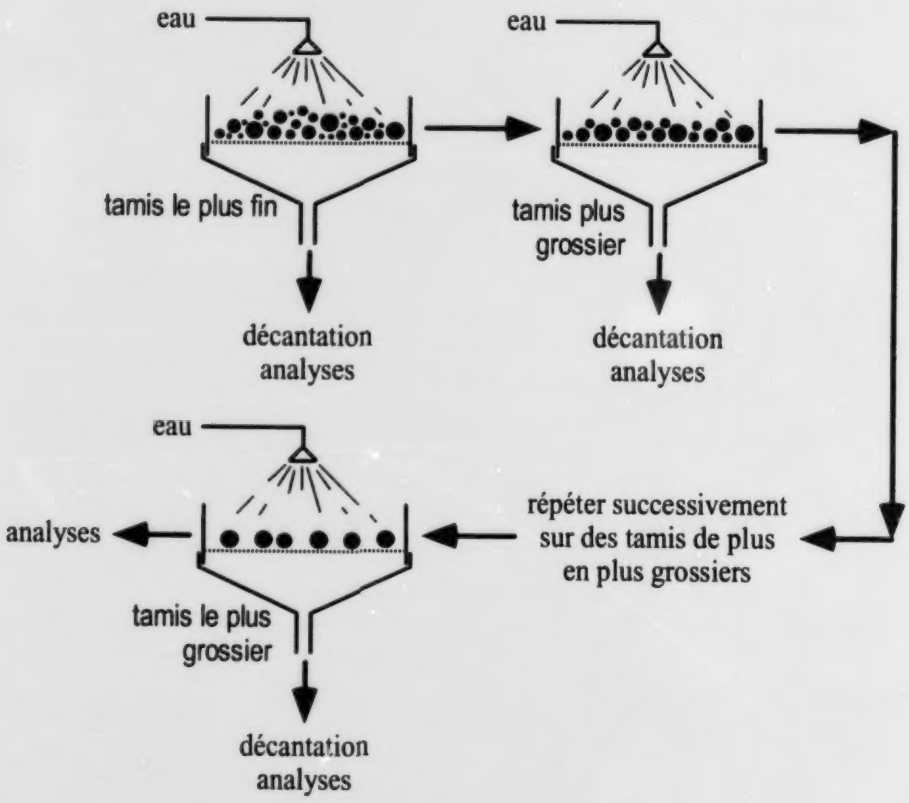


Figure 3.7 - Procédure spéciale de tamisage humide

L'échantillon est déposé tel quel sur le tamis le plus fin de la série sélectionnée pour l'analyse (généralement 325 ou 400 mailles). Les particules fines qui ne sont pas retenues par le maillage du tamis sont lavées par un jet d'eau et récupérées dans un récipient sous le tamis. Cette étape peut être effectuer à l'aide d'un montage fait sur place ou à l'aide d'un équipement spécialement conçu à cet effet (voir annexe A). Le mélange particules fines/eau est laissé à reposer pour une période d'au moins 16 heures puis l'excès d'eau est retiré par décantation. L'ajout d'un agent floculant peut s'avérer nécessaire lorsque la présence d'une grande quantité de particules très fines entraîne des temps de sédimentation inacceptablement trop longs. Par la suite, la partie sédimentée est récupérée pour les fins d'analyses.

La portion de l'échantillon retenue sur le tamis est récupérée pour être déposée sur la surface d'un tamis plus grossier. Les particules qui ne sont pas retenues par la surface de tamisage sont entraînées par lavage pour être récupérées dans un récipient sous le tamis. Le contenu est laissé à reposer pour une période d'au moins 16 heures puis l'excès d'eau est retiré par décantation (l'ajout d'un agent floculant n'est pas nécessaire dans ce cas). Par la suite, la partie sédimentée est récupérée pour les fins d'analyses. Il est nécessaire de répéter successivement cette opération sur des tamis de plus en plus grossiers. Finalement, le matériel retenu sur le tamis le plus grossier est récupéré pour être analyser tel quel sans autre manipulation.

3.2.2 Analyses des contaminants organiques et inorganiques

Pour l'analyse des différents paramètres de chaque fraction granulométrique, il est essentiel de se référer aux méthodes recommandées par le Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec ou par Environnement Canada.

Les références en matière de sédiments proviennent d'un document rédigé par Environnement Canada et le Centre Saint-Laurent en collaboration avec le Ministère

de l'Environnement du Québec (1992) et intitulé "Guide méthodologique de caractérisation des sédiments". Ce guide traite principalement de la réception, la conservation et la préparation des échantillons ainsi que des méthodes d'analyse recommandées ou exigées. De plus, il est question dans ce document des directives d'assurance et de contrôle de la qualité. Le tableau 3.6 présente les méthodes analytiques de dosage prescrites pour les contaminants inorganiques et organiques.

Tableau 3.6 - Liste des méthodes analytiques de dosage des contaminants inorganiques et organiques pour les sédiments

Paramètre	Méthode analytique de dosage
Solides volatils	Calcination à 550°C
Azote total kjeldahl et phosphore total	Méthode colorimétrique
Mercure total	Spectrophotomètre d'absorption atomique - vapeur froide
Arsenic	Spectrophotomètre d'absorption atomique - génération d'hydrures
Métaux (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V et Zn)	Spectrophotomètre d'absorption atomique à la flamme ou au four Spectrophotométrie d'émission atomique au plasma d'argon
Cyanures totaux	Méthode colorimétrique avec la pyridine et l'acide barbiturique Méthode par électrode sélective
Carbone organique total	Méthode Carbone Hydrogène Azote (CHN) Méthode du four oxydant
Polychlorobiphényles, pesticides organochlorés et hexachlorobenzène	Chromatographie en phase gazeuse - détecteur à capture d'électrons
Huiles et graisses totales et minérales	Extraction au Soxhlet - spectrophotométrie infrarouge
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	Chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse
Dioxines et furannes chlorés	Chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse
Composés phénoliques	Chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse (avec ou sans préparation d'un dérivé)

Pour sa part, l'analyse des échantillons de sol doit être effectuée en se référant au document intitulé "Conservation et analyse des échantillons d'eau et de sol: guide des méthodes" produit par le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (1996). Les procédures d'analyses chimiques applicables aux sols y sont sommairement décrites en regard des paramètres visés par la Politique de réhabilitation des terrains contaminés. Il est possible de se procurer les méthodes détaillées pour chaque paramètre auprès du service des laboratoires du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. Une liste des méthodes analytiques de dosage des contaminants organiques et inorganiques pour les sols est présentée au tableau 3.7.

Finalement, l'analyse des échantillons de boues doit être effectuée en se référent au document intitulé "Procédure d'évaluation des caractéristiques des déchets solides et des boues pompables" produit par le ministère de l'Environnement du Québec (1985). Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse pour évaluer la concentration de certains contaminants mentionnés dans le Règlement sur les déchets dangereux y sont décrites. Comme pour le cas des analyses de sols, il est possible de se procurer les méthodes détaillées pour chaque paramètre auprès du service des laboratoires du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec.

L'analyse des hydrocarbures pétroliers dans les échantillons de sol a fait l'objet d'une étude particulière sous la conduite du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (1995) et dont les résultats sont présentés dans le document intitulé "Problématique des sols et des eaux souterraines contaminés par des produits pétroliers". Les problèmes d'analyse reliés à la grande diversité de composés chimiques constituant les mélanges d'hydrocarbures y sont traiter. De plus, les domaines d'application des méthodes d'analyse prescrites en fonction de la nature des hydrocarbures sont décrits. Ce document constitue une référence essentielle en regard des nombreux problèmes analytiques reliés aux hydrocarbures.

Tableau 3.7 - Liste des méthodes analytiques de dosage des contaminants inorganiques et organiques pour les sols

Paramètre	Méthode analytique de dosage
Bromures	Spectrophotométrie visible (longueur d'onde de 590 nm)
Cyanures disponibles et totaux	Spectrophotométrie visible (longueur d'onde de 580 nm)
Fluorures	Colorimétrie (longueur d'onde de 620 nm)
Métaux (Cd, Co, Cr, Cu, , Ni, Pb et Zn)	Spectrophotomètre d'absorption avec flamme air-acétylène Spectrophotométrie d'émission atomique au plasma
Molybdène et Étain	Spectrophotomètre d'absorption atomique à la flamme avec atomisation électrothermique Spectrophotométrie d'émission atomique au plasma
Barium	Spectrophotomètre d'absorption atomique avec flamme acétylène oxyde nitreux Spectrophotométrie d'émission atomique au plasma
Arsenic et Sélénium	Spectrophotomètre d'absorption atomique - génération d'hydrures
Argent	Spectrophotomètre d'absorption avec flamme air-acétylène
Mercure	Spectrophotomètre d'absorption atomique après génération de vapeur
Soufre total	Fournaise à induction de type Leco et titration
Biphényles polychlorés	Chromatographie en phase gazeuse - détecteur à capture d'électrons
Chlorobenzène	Chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse Chromatographie en phase gazeuse - détecteur à capture d'électrons
Composés aromatiques monocycliques voaltils	Chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse Chromatographie en phase gazeuse - détecteur à flamme ionisante ou à photo-ionisation
Composés phénoliques	Chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse Chromatographie en phase gazeuse - détecteur à flamme ionisante ou à capture d'électrons Méthode colorimétrique
Composés volatils halogénés	Chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse Chromatographie en phase gazeuse - détecteur à capture d'électrons ou de type Hall
Huiles et graisses minérales (hydrocarbures)	Extraction au Soxhlet - spectrophotométrie infrarouge
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	Chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse Chromatographie en phase gazeuse - détecteur à flamme ionisante
Produits pétroliers (identification)	Chromatographie en phase gazeuse - détecteur à flamme ionisante

Les quantités d'échantillon requises pour les analyses sont présentées au tableau 3.8. Elles varient en fonction du type d'échantillon (sédiments, sols ou boues) car la teneur en eau est très différente d'une matrice à l'autre. De plus, il s'agit de quantités requises par fraction granulométrique analysée. Il est donc nécessaire de multiplier les quantités par le nombre de fractions granulométriques choisi (voir section 3.2.1).

Tableau 3.8 - Quantités requises par fraction granulométrique pour l'analyse des contaminants organiques et inorganiques

Matrice	Quantité requise
sédiment	3 L (3 à 4 kg)
sol	2 kg
boue	2 kg (minimum)

3.2.3 Traitement des résultats

Les résultats d'analyse pour chaque contaminants sont combinés à ceux de l'analyse granulométrique dans le but de déterminer la répartition granulométrique du contaminant tel que développé au tableau 3.9.

Tableau 3.9 - Exemple typique de répartition granulométrique du cuivre sur les 5 fractions

Fraction (µm)	Pourcentage massique (%)	Teneur en Cu (ppm)	Masse pondérée (mg/100g)	Répartition du Cu (%)
+600	17,4	1405	24,45	30,4
-600 +425	21,2	840	17,81	22,1
-425 +212	21,7	466	10,11	12,6
-212 +75	22,9	695	15,92	19,8
-75	16,8	724	12,16	15,1

La masse pondérée représente la masse de cuivre présente dans chaque fraction sur une base de 100 grammes d'échantillon qui est calculée à partir de la teneur (concentration de cuivre mesurée pour chaque fraction granulométrique) et du pourcentage massique. La répartition du cuivre pour une fraction donnée est obtenue à partir de la masse pondérée correspondante et de la somme des masses pondérées. Les résultats sont illustrés en produisant le graphique de la répartition et la teneur en fonction des fractions granulométriques (voir figure 3.8).

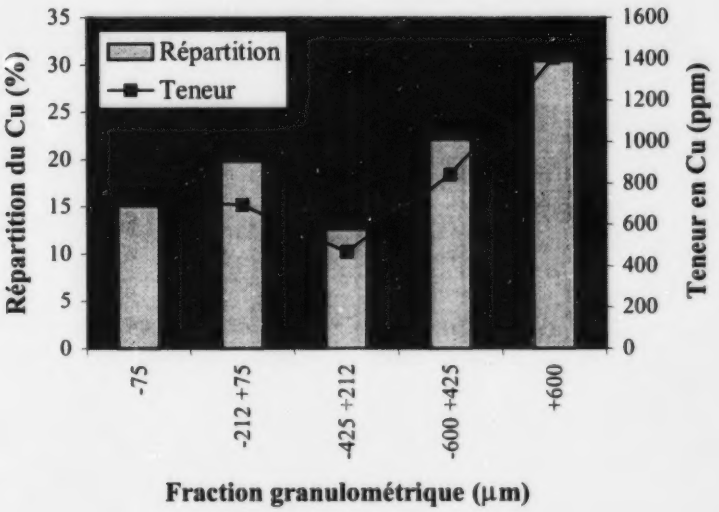


Figure 3.8 - Répartition et teneur en cuivre en fonction des fractions granulométriques

Pour une fraction donnée, une teneur en cuivre élevée ne signifie pas nécessairement un pourcentage de répartition élevé. La valeur de la répartition dépend aussi du pourcentage massique de la fraction en question. Les fractions comprenant les particules de diamètre inférieur à 75 µm et celles de diamètre couvrant l'intervalle entre 75 et 212 µm en sont un bon exemple. La teneur en cuivre de la première fraction est légèrement plus élevée que celle de la deuxième mais la valeur de son pourcentage massique est nettement plus petite. Conséquemment, la valeur de la répartition de cuivre est plus petite dans la première des deux fractions.

3.3 La minéralogie et ses outils d'analyse

3.3.1 La minéralogie

La minéralogie constitue une branche de la géologie qui traite des minéraux, de leurs propriétés chimiques et physiques ainsi que de leur formation. Les rochers formant les montagnes, le sable couvrant les plages et la terre fertile où pousse le blé sont des exemples de l'omniprésence des minéraux dans l'environnement. Un minéral est défini comme étant un solide naturel homogène de composition définie, mais généralement non fixe, et présentant un arrangement atomique ordonné. De plus, il est habituellement formé par des procédés inorganiques. Les minéraux sont classés en fonction de leur composition chimique et de leur structure interne (Hurlbut et Klein, 1977). Ils peuvent être divisés en douze classes, soit:

- les éléments natifs,
- les sulfures,
- les sulfosels,
- les oxydes (et hydroxydes),
- les halogénures,
- les carbonates,
- les nitrates,
- les borates,
- les phosphates,
- les sulfates,
- les tungstates et
- les silicates.

La classe la plus importante est celle des silicates car elle représente 25% des minéraux connus à ce jours. En effet, la silice détient le deuxième rang parmi les éléments chimiques les plus communément rencontrés dans la croûte terrestre.

La principale propriété servant à identifier les minéraux est reliée aux caractéristiques cristallines de chacun. Celles-ci varient en fonction des longueurs et des angles de liaisons entre les molécules constituant les minéraux (Barrow, 1988). En effet, les cristaux sont caractérisés par une disposition de plans bien définie. L'étude de la diffusion des rayons de différentes natures (rayons X, faisceaux de neutrons,

faisceaux d'électrons) par les cristaux a mené à l'élaboration de méthodes expérimentales d'identification des minéraux. Parmi ces dernières, la méthode par diffraction des rayons X (DRX) est la plus utilisée. Les informations obtenues par DRX sont combinées afin d'obtenir la distance entre deux plans cristallins qui est spécifique à un minéral en particulier. L'identification des minéraux peut être effectuée par cette méthode puisque les valeurs de ce paramètre sont connues pour la totalité des minéraux connus. Généralement, l'analyse par DRX procure des informations sur la composition de la matrice c'est-à-dire la composition du sédiment ou du sol naturel.

L'analyse par DRX est accomplie à l'aide d'échantillons de 2 grammes de chaque fraction granulométrique sélectionnée. Les échantillons sont préalablement séchés à 110°C puis broyés à l'aide d'un pulvérisateur à impact afin de réduire la taille des particules (< 75 µm). La procédure à suivre pour l'analyse comme telle diffère quelque peu d'un appareil à l'autre. C'est pourquoi il est nécessaire de se référer aux instructions du fabricant de l'appareil utilisé. Il est possible d'identifier jusqu'à 13 phases minéralogiques cristallines différentes à l'aide de cette méthode. Cependant, le matériel constituant l'échantillon doit obligatoirement être sous forme cristalline car l'analyse par DRX n'est pas conçue pour identifier les gels ou les verres. De plus, une teneur élevée en fer peut provoquer une interférence lors de l'analyse de l'échantillon.

Les phases minéralogiques identifiées par DRX sont généralement d'origine naturelle et constituent la matrice de l'échantillon analysé, c'est-à-dire les minéraux naturels constituant les sédiments, les sols ou les boues. Seuls les contaminants inorganiques dont la teneur dépasse 10 000 ppm peuvent être identifiés par cette méthode mais des teneurs aussi élevées sont rarement rencontrées. Par contre, les résultats de l'interprétation modale peuvent servir à déterminer si un contaminant inorganique qui a été détecté par analyse chimique (section 3.2.2) est associé à l'apparition d'un

minéral plus commun et à confirmer que le contaminant en question est externe à la matrice.

3.3.2 L'interprétation modale

La connaissance des minéraux présents dans un échantillon ainsi que la connaissance de leur composition chimique conduisent à l'interprétation modale. En effet, cette dernière consiste en la conciliation de ces éléments afin de connaître les proportions probables de chaque minéral identifié dans l'échantillon. La composition chimique est obtenue par l'analyse chimique de plusieurs paramètres: les éléments majeurs, le carbone total, le carbone organique total, le soufre total et la perte au feu.

Les éléments majeurs habituellement présents dans les sols et les sédiments sont les suivants: Na_2O, Mg0, Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5, K_2O, CaO, TiO_2, MnO et Fe_2O_3. Les éléments à analyser dans le cas des boues dépendent de leur origine. Il existe actuellement deux méthodes analytiques pour les éléments majeurs, il s'agit de la fluorescence X et de la spectrophotométrie d'émission atomique au plasma argon (ICP-AES). La quantité d'échantillon requise pour chaque analyse est de 2 grammes et les résultats sont présentés sous forme d'oxydes. Les documents décrivant ces deux méthodes d'analyse sont disponibles au Centre de Recherches Minérales (Gagné, 1990 et Boivin, 1989).

Le carbone total (CT) et le carbone organique total (COT) sont dosés par chauffage (1200°C) sous atmosphère d'oxygène dans une fournaise. Le carbone présent dans l'échantillon est oxydé en CO_2 qui est mesuré par un détecteur à infrarouge. L'échantillon est utilisé tel quel pour la mesure du carbone total mais il subit un traitement à l'acide (HCl ou HNO_3) pour la mesure du carbone organique total. En effet, le carbone inorganique se présente généralement sous forme de carbonate dans les minéraux. L'addition d'acide décompose le carbonate en eau (H_2O) et en dioxyde de carbone (CO_2). La quantité d'échantillon requise pour ces analyses est de 2

grammes par analyse. Le document décrivant ces deux méthodes d'analyse est disponible au Centre de Recherches Minérales (De Blois, 1991).

Pour sa part, le soufre total (S) est dosé par chauffage (1200°C) sous atmosphère d'oxygène dans une fournaise. Les sulfures présents dans l'échantillon sont oxydés en SO_2 qui est mesuré par un détecteur à infrarouge. L'échantillon est analysé tel quel, sans traitement supplémentaire. La quantité d'échantillon requise pour cette analyse est de 1 gramme.

La mesure de la perte au feu (PAF) est effectuée par méthode gravimétrique. Un échantillon de 2 g est calciné (1150°C) dans une fournaise pendant deux heures. Le résultat est obtenu par différence des masses avant et après la calcination. Le document décrivant cette méthode ainsi que celle du dosage du soufre total est disponible au Centre de Recherches Minérales (De Blois, 1991).

Comme cité au début de la présente section, l'interprétation modale est la conciliation entre les résultats des analyses chimiques et la composition proposée des minéraux identifiés par DRX afin de connaître les proportions probables de chaque minéral. Des exemples typiques des résultats d'analyses chimiques et d'une interprétation modale sont proposés aux tableaux 3.10 et 3.11.

Tableau 3.10 - Exemple typique des résultats d'analyses chimiques

Fraction (µm)	% M (%)	Na_2O (%)	MgO (%)	SiO_2 (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	TiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	PAF (%)	COT (%)	CT (%)	S (%)	Tot
-45	34,7	2,3	2,9	56,4	0,3	2,6	1,2	7,7	8,3	2,3	5,5	0,5	81,7
-75 +45	12,7	2,9	1,7	63,5	0,3	2,4	1,0	5,7	3,7	1,0	2,2	0,5	81,2
-150 +75	19,4	2,9	1,4	63,8	0,2	2,5	0,9	6,4	3,0	1,0	1,5	0,5	81,1
+150	33,2	2,6	1,0	62,8	0,1	2,4	0,4	4,6	11,3	6,1	4,8	0,4	85,2
Total	100,0	2,6	1,8	60,9	0,2	2,5	0,9	6,2	7,7	3,1	4,1	0,5	82,8

Légende % M: pourcentage massique
Tot: total des contributions des composés analysés (oxydes majeurs + PAF)

Tableau 3.11 - Exemple typique d'une interprétation modale

Fraction (µm)	% M (%)	QTZ (%)	PLA (%)	KFE (%)	DOL (%)	CAL (%)	APA (%)	ILM (%)	MAG (%)	SUL (%)	ORG (%)	ACM (%)	Tot
-45	34,7	27,9	19,2	13,0	1,6	10,7	0,7	2,3	4,5	1,1	2,3	16,6	100,0
-75 +45	12,7	31,4	24,2	12,0	1,0	3,9	0,7	1,9	3,2	1,1	1,0	19,7	100,0
-150 +75	19,4	31,4	24,2	12,5	0,8	2,5	0,5	1,7	3,8	1,1	1,0	20,6	100,0
+150	33,2	32,2	21,7	12,0	0,6	10,3	0,2	0,8	2,9	0,9	6,1	12,4	100,0
Total	100,0	30,5	21,6	12,4	1,0	8,1	0,5	1,6	3,7	1,0	3,1	16,4	100,0

Légende QTZ: quartz
PLA: feldspath plagioclase
KFE: feldspath potassique
DOL: dolomite
CAL: calcite
APA: apatite
ILM: ilmémite
MAG: magnétite
SUL: sulfures (essentiellement la pyrite)
ORG: matière organique
ACM: ensemble des amphiboles, chlorites et micas

Seuls les paramètres jugés essentiels à l'interprétation modale sont présentés au tableau 3.10. Conséquemment, les valeurs des totaux de la dernière colonne n'atteignent pas 100%. Le tableau 3.11 montre les proportions probables de chaque minéral préalablement identifié par DRX. Ces valeurs sont calculées par résolution algébrique de n équations à n inconnus. Dans cet exemple, l'ilménite ($FeTiO_3$) est la seule source de titane préalablement identifiée par DRX et sa proportion est calculée par stœchiométrie en divisant la teneur en TiO_2 par le facteur 0,53 (masse molaire de TiO_2/masse molaire de $FeTiO_3$ = 79,9/151,75). Les informations acquises par l'interprétation modale sont limitées aux phases inorganiques et métalliques présentes dans un échantillon donné. L'interprétation modale ne donne aucune information pertinente aux phases organiques contaminantes.

L'interprétation modale fournit généralement des informations relatives à la composition de la matrice. Les phases métalliques ne peuvent être intégrées à l'interprétation modale lorsqu'elles ne sont pas détectées par DRX (voir section précédente). Cependant, les informations obtenues à propos de la matrice sont essentielles à la sélection d'une méthode de séparation. La masse volumique et les propriétés hydrophiles des matériaux en question représentent les données les plus utiles. En effet, certains équipements minéralurgiques sont tributaires de la différence de masses volumiques entre les matériaux et d'autres dépendent des propriétés

hydrophobes et hydrophiles des matériaux. Certains minéraux tels que le graphite, le charbon ou le talc sont naturellement hydrophobes. Par contre, la majorité des minéraux sont hydrophiles à différents degrés en fonction de l'intensité de leur polarité, c'est-à-dire que le degré d'affinité pour l'eau augmente avec le degré de polarité. Le degré de polarité de certains minéraux communs est présenté au tableau 3.12.

Tableau 3.12 - Degré de polarité de certains minéraux

Faiblement polaire	Moyennement polaire	Fortement polaire
Chalcopyrite	Apatite	Feldspath
Galène	Calcite	Quartz
Pyrite	Dolomite	
	Fluorite	

Extrait de Wills (1992).

3.3.3 Phases porteuses et degré de libération des contaminants inorganiques

Comme l'interprétation modale fournit rarement des informations à propos des phases métalliques contaminantes, il s'avère nécessaire d'approfondir l'étude afin d'identifier les phases porteuses de la contamination métallique et leur degré de libération. Le terme "phase porteuse" réfère à la forme sous laquelle le contaminant en question se présente. Le cuivre natif (Cu), la chalcopyrite ($CuFeS_2$), la covellite (CuS) et la cuprite (Cu_2O) sont des exemples des phases porteuses du cuivre à différents états d'oxydation. Pour sa part, le degré de libération correspond au pourcentage d'un minéral donné présent en tant que particule libre dans un mélange (Kelly et Spottiswood, 1982).

L'identification des phases porteuses est précédée d'une concentration des contaminants métalliques en employant la méthode de séparation par liquide lourd. Cette méthode repose sur l'utilisation d'un liquide présentant une masse volumique

intermédiaire à celles des minéraux à séparer. L'iodure de méthylène est un liquide lourd fréquemment employé car sa masse volumique est de 3,3 g/cm^3. Les phases porteuses de métaux sont séparées par sédimentation grâce leur masse volumique plus élevée. Les minéraux constituant la matrice présentent généralement une masse volumique plus faible et auront tendance à flotter à la surface du liquide lourd. En effet, la masse volumique du quartz est de 2,65 g/cm^3 et celle du feldspath plagioclase est d'environ 2,69 g/cm^3. La quantité d'échantillon requise (par fraction granulométrique étudiée) pour cette procédure est de 50 grammes lorsque le diamètre moyen des particules constituant l'échantillon est supérieur à 45 µm. Pour les cas où de diamètre moyen des particules est inférieur à 45 µm, la quantité d'échantillon requise est de 15 grammes et la sédimentation doit être accélérée à l'aide d'une centrifugeuse.

Les concentrés ainsi obtenus sont préparés en sections polies afin de les observer au microscope optique (facteur de grossissement jusqu'à 1000). Les phases porteuses sont identifiées visuellement par leur couleur, leur forme et leur texture. Il s'agit d'une procédure couramment employée en minéralogie. Lorsque la granulométrie est trop fine ou en cas de doute, l'identification est effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage équipé d'une sonde (spectromètre de dispersion de l'énergie). Les grains soupçonnés d'être porteurs de la contamination sont analysés à l'aide de la sonde afin de confirmer la présence du contaminant inorganique.

Le degré de libération est aussi estimé par observation au microscope optique ou au microscope électronique à balayage en utilisant les mêmes concentrés préparés en lames minces. Il est évalué visuellement en observant l'aspect des grains. Les différents états de la phase porteuse peuvent être décrits comme suit: libre, en association avec un autre minéral ou en inclusion à l'intérieur d'un autre minéral. Ces états sont illustrés à la figure 3.9.

phase minérale libre | phase minérale associée | phase minérale incluse

Figure 3.9 - Les différents états de libération

Le degré de libération des minéraux dépend généralement du diamètre des particules; il augmente de façon inversement proportionnelle au diamètre des particules. De plus, un degré de libération élevé a pour conséquence de faciliter la séparation des contaminants inorganiques de la matrice. Lorsqu'un contaminant inorganique est complètement libre, la masse volumique des particules est identique à celle du contaminant en question et les propriétés de surface sont constantes. S'il est associé à un autre minéral comme de la silice, la masse volumique des particules varie en fonction des proportions de chaque minéral présent et les propriétés de surfaces ne sont pas constantes. Pour les cas où le contaminant inorganique est inclus dans un autre minéral, la masse volumique des particules varie encore en fonction des proportions de chaque minéral présent et les surfaces ont des propriétés constantes mais indésirables.

3.4 Quantités requises pour les analyses et résultats

3.4.1 Quantités requises pour les analyses

Les diverses analyses qui ont été décrites dans le présent chapitre nécessitent différentes quantités de matériel. Ces dernières sont rappelées dans le tableau 3.13.

Tableau 3.13 - Quantités de matériel requises pour les différentes analyses

Analyse	Quantité requise
Analyse granulométrique	200 à 300 g
Analyses des contaminants inorganiques et organiques	sédiment: 3 à 4 kg/fraction* sol: 2 kg/fraction* boue: >2 kg/fraction*
Analyse par diffraction des rayons X	2 g/fraction*
Éléments majeurs	2 g/fraction*
Carbone total	2 g/fraction*
Carbone organique total	2 g/fraction*
Soufre total	1 g/fraction*
Perte au feu	2 g/fraction*
Séparation par liquide lourd	15 à 50 g/fraction*

* Multiplier la quantité requise par le nombre de fractions granulométriques à analyser.

La caractérisation complète d'un échantillon par l'approche minéralurgique nécessite environ 11 kg de matériel sur une base sèche si le nombre de fractions granulométriques est de cinq. Les coûts reliés à sa réalisation s'élèvent aux environs de $5 000.

3.4.2 Utilisation des résultats

Les résultats de l'analyse granulométrique et la connaissance de la répartition granulométrique des contaminants associés à l'étude minéralogique (degré de libération) sont des indicateurs du degré de facilité à décontaminer ainsi que des équipements qui pourront éventuellement être utilisés pour la décontamination. La figure 3.10 expose ce degré en fonction de la grosseur des particules constituant le

matériel à traiter, ceci dans la mesure où les contaminants inorganiques sont externes à la matrice (degré élevé de libération).

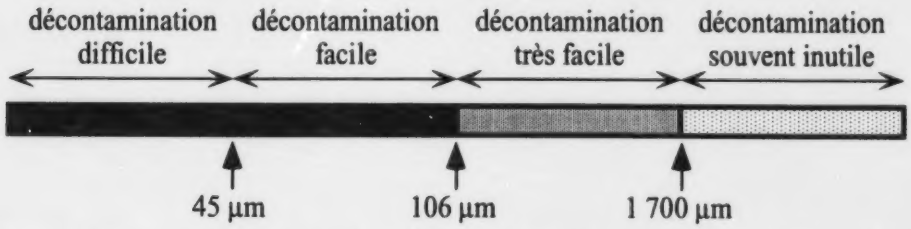


Figure 3.10 - Degré de facilité à décontaminer en fonction de la grosseur de particules dans le cas où les contaminants inorganiques sont libres

D'une façon générale, il est assez difficile, mais non impossible, de décontaminer les matériaux dont le diamètre moyen des particules est inférieur à 45 µm. Il s'agit d'une taille de particules indésirable dans les procédés minéralurgiques conventionnels. Leur présence a pour conséquence de diminuer l'efficacité de la séparation des phases contaminantes. La diminution de l'efficacité se traduit par la présence de matériaux non contaminés dans la phase contaminante qui a été séparée; ce qui entraîne une augmentation indésirable de son volume. Les équipements qui ont été développés récemment comble en partie cette lacune. Par contre, le traitement des particules de diamètre variant entre 45 et 1700 µm peut être facilement ou très facilement effectué à l'aide d'une gamme fort variée d'équipements minéralurgiques.

La littérature scientifique fait état de la faible contamination des particules de nature minérale (sol et sédiment) dont le diamètre est supérieur à 1700 µm. En particulier, l'Agence de Protection Environnementale des États-Unis a produit plusieurs documents qui témoignent de ce fait (U.S. EPA, 1993 feb., U.S. EPA, 1993 aug., U.S. EPA, 1992, U.S. EPA, 1990). Les travaux de recherche menant à la caractérisation des sédiments du port de Hambourg ont démontré que la fraction grossière de ces sédiments comportait une contamination pratiquement nulle alors que la fraction fine (argile et limon) contenait presque la totalité de la contamination (Kröning, 1990). Des sédiments provenant d'une zone portuaire de Montréal ont été caractérisés (St-

Laurent et al., 1997). Les analyses ont démontré qu'environ 70% des contaminants inorganiques présents étaient situés dans la portion fine (< 45µm).

Cependant, la présence de débris de nature organique comme des copeaux de bois démontre le phénomène inverse (U.S. EPA, 1994b) qui est attribuable à la grande affinité des métaux et des substances organiques pour la matière organique. Dans tous les cas, l'analyse de la fraction grossière est essentielle pour déterminer l'utilité d'une éventuelle décontamination de cette fraction.

Le choix des équipements minéralurgiques appropriés est effectué à l'aide des résultats des diverses analyses qui ont été décrites jusqu'à présent. Ces équipements sont regroupés en quatre grandes classes dont le principe de fonctionnement et les conditions d'utilisation sont résumés au tableau 3.14.

Tableau 3.14 - Les principes de fonctionnement des équipements minéralurgiques et leurs conditions d'utilisation

Type d'équipement	Principe de fonctionnement	Conditions d'utilisation
Concentration gravimétrique	Différence de masse volumique entre les minéraux	- taille des particules supérieure à 1 µm - différence entre les masses volumiques des matériaux à séparer supérieure à 1 g/cm^3 - degré élevé de libération des contaminants inorganiques
Flottation	Propriétés hydrophobes et hydrophiles des surfaces des particules	- taille des particules supérieure à 5 µm - surfaces des particules à séparer démontrant des propriétés hydrophobes de façon naturelle ou stimulée (ajout de réactifs chimiques) - degré moyen de libération des contaminants inorganiques (exempts de phases inorganiques incluses)
Séparation magnétique	Propriétés magnétiques des minéraux	- contaminants métalliques présentant des propriétés ferromagnétiques (fer, magnétite) - taille des particules supérieure à 75 µm - degré moyen de libération des contaminants inorganiques
Séparation électrostatique	Différence de conductivité électrique entre les minéraux	- taille des particules comprise entre 60 et 500 µm - les matériaux à séparer doivent être parfaitement secs - degré élevé de libération des contaminants inorganiques

Le tableau 3.14 révèle que la taille de particule minimale requise pour l'application des équipements de concentration gravimétrique est de 1 µm. Cependant, la masse des particules de diamètre inférieur 45 µm est si faible que la gravité parvient difficilement à effectuer à elle seule une séparation efficace. Il devient alors nécessaire d'ajouter au phénomène de gravité celui de la force centrifuge qui est de même nature.

La flottation nécessite un degré moyen de libération des contaminants inorganiques. Par contre, la présence de phases (contaminants) inorganiques incluses est indésirable car la surface de ces particules présente généralement les mêmes propriétés que les particules constituant la matrice. Dans ces circonstances, la séparation est impossible par cette approche. Parmi les équipements minéralurgiques, seuls les équipements de flottation se révèlent être efficaces face à une contamination d'origine organique telle que des hydrocarbures ou des biphényls polychlorés. L'hydrophobicité de la substance contaminante est essentielle à l'application de la flottation.

Par ailleurs, des équipements de séparation magnétique très sophistiqués peuvent traiter des matériaux dont la taille des particules est de l'ordre du micron ainsi que des contaminants inorganiques de nature paramagnétique (hématite, ilménite). Jusqu'à maintement, leur application est limitée au traitement de certains minérais très spécifiques (exemple: la kaolinite).

Finalement, la séparation électrostatique peut rarement être employée pour les applications environnementales puisqu'il s'agit d'une méthode qui s'applique uniquement aux matériaux parfaitement secs car la présence d'humidité modifie le comportement des particules. La séparation de particules métalliques dans le sable est probablement l'application environnementale la plus avantageuse de la séparation électrostatique. Pour les autres applications (sédiments ou boues), les coûts reliés au séchage du matériel sont tels qu'ils rendent cette alternative peu intéressante. Les coûts reliés au séchage d'un sol sont moindres mais non négligeables.

L'utilisation des quatre types d'équipements dont il a été question dans le tableau 3.14 est restreinte à des plages granulométriques bien définies. En conséquence, le matériel contaminé doit fréquemment subir un pré-traitement qui effectue la séparation du matériel en fonction de la taille des particules par tamisage ou classification. Chaque fraction récupérée est ensuite traitée à l'aide de l'équipement qui lui convient le mieux.

De plus, la répartition granulométrique des contaminants indique quelles fractions granulométriques sont les moins contaminées. Celles qui présentent une contamination très faible ou nulle peuvent alors être séparées sans autre traitement à l'aide des équipements de tamisage ou de classification. Dans certains cas, les équipements de concentration gravimétrique tels que les spirales peuvent aussi utilisés.

L'applicabilité des technologies minéralurgiques pour le traitement des sédiments, des sols et des boues est confirmée en conciliant les données obtenues grâce à la caractérisation par l'approche minéralurgique et les informations contenues dans le tableau 3.14. À la suite d'une telle confirmation, les équipements minéralurgiques appropriés sont sélectionnés afin d'élaborer un schéma de traitement préliminaire. Le chapitre qui suit porte sur la description de ces équipements et de leurs principes de fonctionnement.

Chapitre 4

Technologies minéralurgiques applicables à la décontamination

Les procédés minéralurgiques ont pour fonction d'effectuer la séparation physique du minerai dans le but de produire une portion enrichie contenant la majeur fraction des minéraux visés (le concentré) et une portion pauvre constituée presque exclusivement de la gangue (le rejet) comme illustré à la figure 4.1.

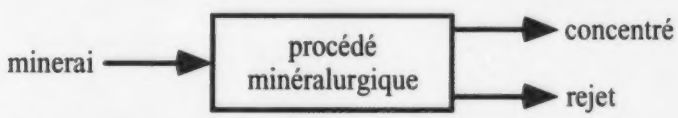


Figure 4.1 - La séparation physique accomplie par les procédés minéralurgiques

Les deux paramètres permettant d'évaluer l'efficacité de la séparation sont la récupération et la teneur (Wills, 1988). La récupération représente le pourcentage de la quantité totale d'un minéral

contenu dans un minerai qui est récupéré dans le concentré. Pour sa part, la teneur signifie la proportion du minéral en question parmi la gangue et les autres minéraux présents. Malheureusement, la relation entre ces deux paramètres est pratiquement inverse. Deux cas très simples peuvent illustrer cette tendance. De petites pépites d'or qui sont dispersées dans un tas de sable doivent être récupérées. Dans un cas, il est possible de les concentrer manuellement en prélevant quelques pépites. La teneur du concentré ainsi obtenu est de 100% mais la récupération est très faible puisque la majorité des pépites sont restées dans le tas de sable. Dans l'autre cas, aucune concentration n'est effectuée. En conséquence, la récupération est de 100% mais la teneur n'augmente pas. La figure 4.2 présente une courbe typique de la relation entre ces deux paramètres.

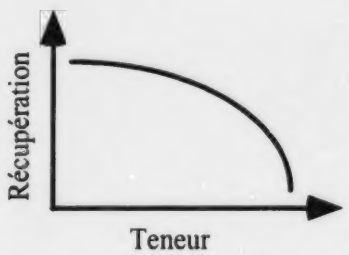


Figure 4.2 - Courbe typique de la récupération en fonction de la teneur

Lorsqu'il est indispensable d'obtenir une teneur élevée, la récupération doit être sacrifiée et vice versa. Dans la réalité, chaque cas de concentration de minerai est étudié afin de parvenir à un compromis intermédiaire qui produira un concentré approprié à l'étape subséquente de traitement par hydrométallurgie ou par pyrométallurgie.

La décontamination des sédiments, des sols et des boues peut être examinée parallèlement. Les contaminants présents doivent être séparés de la matrice (le sol ou le sédiment) par concentration comme un minéral d'une valeur appréciable. Dans ce cas, la matrice peut être comparée à la gangue. Le but visé par la décontamination est de diminuer la teneur des contaminants de la matrice jusqu'au niveau prescrit par les critères en vigueur et de produire un petit volume de concentré. La matrice décontaminée représente le rejet alors que la portion contenant les contaminants concentrés représente le concentré.

Les quatre principes de concentration gouvernant les méthodes minéralurgiques sont la concentration gravimétrique, la flottation, la séparation magnétique, la séparation électrostatique. Le dernier principe sera abordé de façon superficielle puisqu'il nécessite que le matériel à traiter soit complètement sec. Par contre, les trois autres principes seront décrits et les principaux équipements concernant chaque principe seront détaillés en précisant les conditions de leur application.

Les plages granulométriques à l'intérieur desquelles les équipements qui seront présentés sont efficaces sont relativement restreintes. C'est pourquoi il est presque toujours indispensable de classifier le matériel à traiter en fonction des différentes plages en question. Le présent chapitre comprend une revue des méthodes de classification les plus couramment utilisées accompagnée de la description de leur principe de fonctionnement.

Dans la majorité des cas, les procédés de traitement doivent être précédés d'une étape de traitement préliminaire afin que le matériel à traiter présente les conditions requises au dit traitement. Habituellement, le traitement préliminaire contribue à retirer les composantes pouvant endommager les différents éléments du système de traitement. Il s'agit des gros débris comme des roches, des bouteilles de verre ou des récipients métalliques qui sont séparés par tamisage. Ce chapitre débutera donc par la description des équipements de tamisage.

4.1 Le tamisage

4.1.1 Principes

Comme il a été vu au chapitre précédent, le tamisage vise à séparer le matériel (sédiments, sols ou boues) en fonction de la grosseur des particules. Il existe trois types différents de surface de tamisage industriel: les plaques perforées, les toiles métalliques tissées et les barres profilées (Kelly et Spottishwood, 1982). Le tamisage à l'échelle industrielle peut être accompli à sec ou humide. Les équipements de

tamisage peuvent être de type stationnaire (surface de tamisage statique) ou dynamique (surface de tamisage animée d'un mouvement rotatif, vibratoire ou giratoire).

Les différents appareils sont toujours caractérisés par la taille des ouvertures comme les tamis de laboratoire (voir section 3.1.2). Leur performance est déterminée à l'aide de deux paramètres: la capacité et l'efficacité. La capacité est définie par la gamme de débits de matériel qu'un appareil est en mesure de traiter. Pour sa part, l'efficacité correspond au degré de perfection de la séparation. Une efficacité de 100% est traduite par l'absence de particules de taille inférieure aux ouvertures de la surface de tamisage parmi le matériel retenu sur la surface en question. La capacité et l'efficacité ont des comportements inverses, c'est-à-dire qu'une capacité très élevée entraîne une efficacité faible et vice versa.

Les sédiments, les sols et les boues doivent généralement subir un tamisage afin de retirer les gros débris. Dans le but d'éviter le colmatage, il est souvent utile d'utiliser une série de tamis disposés en ordre décroissant de taille des ouvertures. Par exemple, la taille des ouvertures du premier tamis peut être de 1 pouce, celle du deuxième tamis peut être de ¼ pouce et celle du troisième tamis peut être de 10 mailles (1 700 µm). Le choix des tailles des tamis appropriées ainsi que leur nombre doit être effectué en fonction de la caractérisation du matériel.

Parmi les nombreux équipements de tamisage, les quatre appareils les plus fréquemment employés sont les grizzlys, les trommels, les tamis vibrants et les tamis giratoires. La description et les conditions d'application sont détaillées dans les sections suivantes.

4.1.2 Les grizzlys

Généralement, le matériel contenant une forte proportion de composantes grossières est séparé à l'aide d'un grizzly. Cet appareil est composé d'une série de barres parallèles robustes qui sont montées sur un cadre (voir figure 4.3). Il existe une version modifiée du grizzly dans laquelle les barres sont remplacées par des chaînes. De plus, ces équipements peuvent être stationnaires ou vibrants. Leur surface est inclinée suivant un angle variant entre 20° et 50°. La capacité de l'appareil augmente avec l'angle mais son efficacité diminue par la même occasion. Le matériel à tamiser (sec ou humide) est introduit par le haut de la pente pour qu'il s'écoule dans la même direction que les barres parallèles. Ces équipements sont recommandés pour des tailles de séparation qui varient entre 20 mm et 300 mm (Wills, 1988). De plus, ils sont caractérisés par une capacité très élevée (jusqu'à 1000 tonnes/heure) ainsi qu'une faible efficacité.

4.1.3 Les trommels

Les trommels sont principalement composés d'une surface de tamisage de forme cylindrique dont l'axe de rotation est légèrement incliné par rapport à l'horizontale (voir figure 4.4). Le matériel à tamiser est alimenté par le bout le plus élevé du cylindre pour favoriser le déplacement du matériel qui est retenu par la surface de tamisage jusqu'à la sortie. Les particules retenues glissent sur la surface intérieure du trommel en suivant une trajectoire hélicoïdale causée par la rotation de la surface de tamisage cylindrique. Pour sa part, le matériel traversant la surface de tamisage est récupéré sous le cylindre (Blazy, 1970).

Comme illustré à la figure 4.5, les trommels peuvent être disposés en série par ordre décroissant de grosseur des ouvertures des surfaces de tamisage. Les particules qui ne sont pas retenues par la surface de tamisage servent à alimenter le trommel suivant.

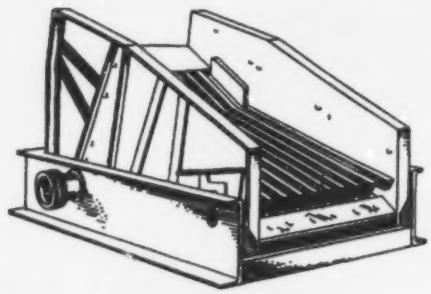


Figure 4.3 - Équipement de tamisage: grizzly vibrant (source: Taggart, 1951)

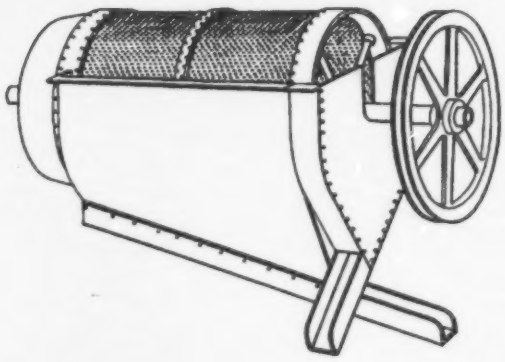


Figure 4.4 - Équipement de tamisage: trommel (source: Richards et Locke, 1940)

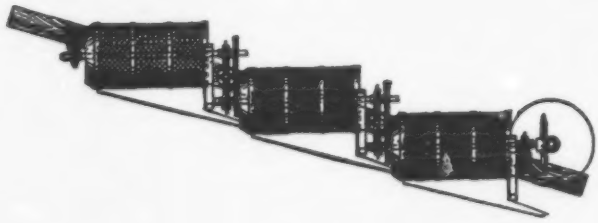


Figure 4.5 - Équipements de tamisage : trommels en série
(source: Richards et Locke, 1940)

Grâce à un système d'engrenages, la rotation de la série de trommels est assurée par un seul mécanisme d'entraînement.

Les trommels sont recommandés pour des tailles de séparation qui varient entre 6 mm et 55 mm et le tamisage peut être effectué à sec ou humide (Wills, 1988). Ce sont des appareils peu dispendieux et robustes mais leur capacité est faible. Elle se situe aux environs de 0,6 tn (1 tn = 2000 lbs) par pieds carrés de surface de tamisage par jour. (un facteur doit s'appliquer en fonction de la finesse de l'ouverture pour le tamisage à sec et aux environs de 1,0 pour le tamisage humide (Taggart, 1945)). De plus, ils ont tendance à colmater facilement, ce qui explique leur efficacité moyenne.

4.1.4 Les tamis vibrants

Les tamis vibrants sont les appareils de tamisage les plus utilisés. Ils sont constitués d'une surface de tamisage plane qui est inclinée selon un angle d'environ 35° par rapport à l'horizontale. La vibration peut être induite de façon circulaire, elliptique ou par chocs (Blazy, 1970). En plus de favoriser le déplacement du matériel, elle sert à prévenir le colmatage des surfaces de tamisage. Qu'ils soient suspendus ou montés sur une base à ressorts, les tamis vibrants occupent très peu d'espace. La figure 4.6 présente un exemple de tamis vibrants à plusieurs étages. Il s'agit d'un système où les surfaces de tamisage (trois dans ce cas) sont agencées par ordre décroissant de grosseur des ouvertures et sont actionnées par le même mécanisme vibratoire. Le matériel à tamiser est introduit par le haut de la pente du tamis supérieur. Les particules qui sont retenues par ce tamis sont récupérées au bas de la pente tandis que celles qui le traversent tombent sur le tamis inférieur.

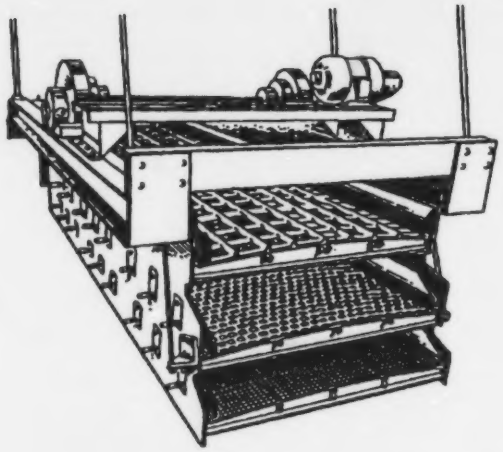


Figure 4.6 - Tamis vibrant à plusieurs étages (source: Taggart, 1951)

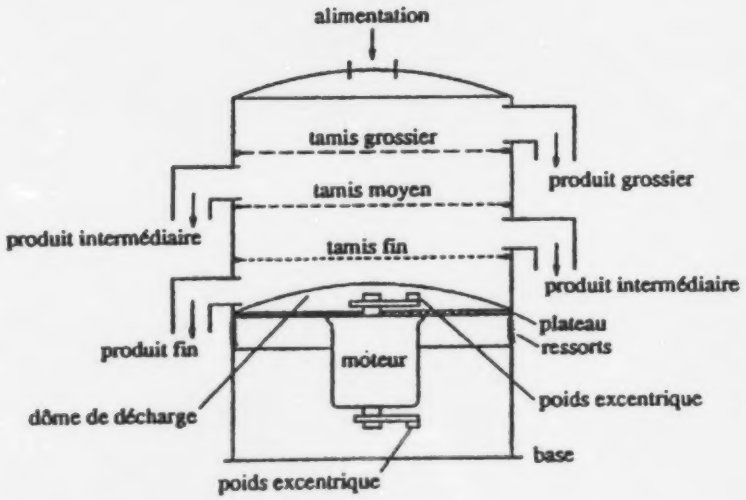


Figure 4.7 - Tamis giratoire (source: Wills, 1988)

Ces équipements servent à séparer des particules dont la taille varie entre 250 µm et 25 cm, qu'elles soient sous forme de pulpe ou sèches. Leur efficacité et leur capacité sont élevées. La capacité se situe entre 10 et 15 tn (1 tn = 2000 lbs) par pieds carrés de surface de tamisage par 24 heures par mm d'ouverture (Taggart, 1945). Par contre, la capacité diminue grandement vers 250 µm (Kelly et Spottishwood, 1982).

4.1.5 Les tamis giratoires

Les tamis giratoires sont composés d'une surface de tamisage de forme circulaire qui est animée d'un mouvement giratoire horizontal et d'un mouvement vibratoire vertical. Le système complet est généralement constitué de trois surfaces de tamisage empilées verticalement en ordre décroissant de grosseur des ouvertures. L'ensemble repose sur une base à ressorts et le mouvement vibratoire est transmis grâce à un poids excentrique qui est fixé au moteur. Les tamis giratoires peuvent être alimenté avec du matériel sec ou avec une pulpe. Le matériel qui est retenu sur le tamis du haut est retiré tandis que celui qui passe le tamis tombe sur le tamis inférieur. Un exemple de cet appareil est présenté à la figure 4.7.

Essentiellement destiné au tamisage fin, ce type d'appareil est conçu pour séparer des particules dont la taille oscille entre 40 µm et 12 mm. Son efficacité est très élevée mais sa capacité est faible, soit un maximum de 40 tonnes par heure pour une surface de 60 pouces de diamètre (pour l'appareil Vibro-Energy Separator Scalper Unit, selon le catalogue du manufacturier Sweco, Inc.).

4.1.6 Conditions d'application

Les sections précédentes ont fait état des tailles de particules en fonction de l'utilisation des appareils qui ont été décrits. Le tableau suivant résume ces conditions d'application en détaillant l'efficacité et la capacité de chaque appareils.

Tableau 4.1 - Application typique des appareils de tamisage

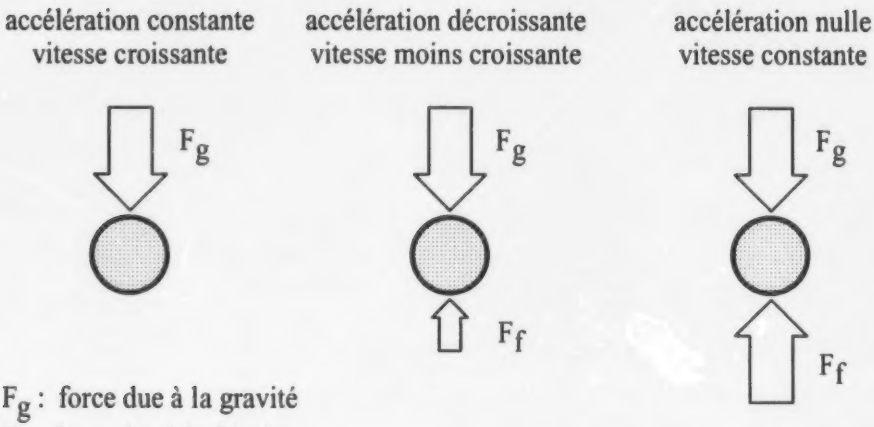
Appareil	Taille des particules	Efficacité	Débit	Capacité
Grizzly	20 mm à 300 mm	faible	< 1000 t/h	très élevée
Trommel	6 mm à 55 mm	moyenne	0,6-1,0 tn/pi^2.24h.mm	faible
Tamis vibrants	250 µm à 250 mm	élevée	10-15 tn/pi^2.24h.mm	élevée
Tamis giratoires	40 µm à 12 mm	très élevée	< 40 t/h	faible

4.2 La classification

4.2.1 Principes

La classification est définie comme la séparation d'un ensemble de particules en fonction de leur taille sur le principe des vitesses terminales de chute différentes. Ce concept qui a été abordé de façon sommaire dans la section portant sur l'élutriation (section 3.1.5) sera détaillé dans la présente section. La figure 4.8 illustre de façon simplifiée les trois comportements possibles d'une particule solide soumise l'attraction gravitationnelle.

Lorsqu'une particule solide se situe dans le vide absolu, sa vitesse augmente continuellement en fonction de l'accélération. Par contre, sa vitesse augmente à un taux moindre lorsqu'elle se situe dans un fluide visqueux quelconque comme l'air ou l'eau. En effet, la force due à la gravité est combattue par la force due à la friction occasionnée par le mouvement de la particule dans le fluide visqueux. La force due à



F_g : force due à la gravité
F_f : force due à la friction

Figure 4.8 - Comportements d'une particule solide située dans un champ d'attraction gravitationnelle

la friction est proportionnelle à la vitesse de la particule dans le fluide. Quand la force due à la friction a atteint une valeur égale à la force due à la gravité, la vitesse de la particule atteint une valeur constante, appelée vitesse terminale de chute. Cette dernière varie en fonction des paramètres suivants:

- la taille de la particule solide,
- la masse volumique de la particule solide,
- la forme de la particule solide,
- la viscosité du fluide et
- la masse volumique du fluide.

Le fluide dans lequel baignent les particules est généralement de l'eau mais il peut parfois s'agir de l'air. Seuls les équipements de classification humide (utilisant l'eau comme fluide) seront abordés dans cet ouvrage. Les équipements de classification pneumatique (utilisant l'air comme fluide) nécessite un matériel parfaitement sec. Toutefois, les coûts reliés au séchage des sédiments, des boues et, dans une moindre mesure, des sols rendent cette alternative bien moins réalisable.

Les notions abordées ci-haut constituent la base du phénomène de sédimentation. Il existe deux types de sédimentation : la sédimentation libre et la sédimentation entravée. Seule la quantité de solides en suspension dans le liquide permet de les distinguer. Lorsque cette quantité dépasse un certain seuil, la sédimentation d'une particule est entravée par la présence des particules avoisinantes qui perturbent son trajet vers le bas. Le seuil délimitant les deux types de sédimentation correspond à un volume de solides de 5% en suspension dans le fluide. Le domaine de la sédimentation libre comprend les valeurs inférieures à 5% et celui de la sédimentation entravée comprend les valeurs supérieures à 5%. Qu'il s'agisse de sédimentation libre ou entravée, les paramètres influençant la vitesse terminale de chute sont les mêmes à l'exception de la masse volumique du fluide. En effet, la masse volumique du fluide doit être remplacée par celle de la suspension (eau + solides) dans les cas où la sédimentation entravée s'applique (Blazy, 1970). La sédimentation entravée entraîne une réduction de l'effet de la taille des particules tout en augmentant l'effet de leur densité sur la classification. Les classificateurs reposant sur la sédimentation libre sont utilisés pour effectuer des séparations en fonction de la taille tandis que ceux reposant sur la sédimentation entravée sont utilisés pour effectuer des séparation en fonction de la masse volumique.

En présence d'un fluide stagnant, la sédimentation des particules de taille et de masse volumique différentes s'effectue à un taux qui dépend de la vitesse terminale de chute de chacune. Par opposition, les particules en question peuvent baignées dans un fluide animé d'un courant ascendant constant qui combat la gravité. Les particules soumises à un tel environnement auront un comportement qui varie en fonction de leur vitesse terminale de chute respective. Le courant ascendant entraîne avec lui les particules dont la vitesse terminale de chute est inférieure à sa vitesse. Les particules dont la vitesse terminale de chute est supérieure à la vitesse du courant suivent un trajet opposé.

Ces phénomènes qui ont été décrits précédemment (section 3.1.5) constituent la base de l'élutriation. Finalement, les particules dont la vitesse terminale de chute est égale à la vitesse du courant conserve une position constante. Ce phénomène qui est désigné par le terme fluidisation constitue le principe de fonctionnement de plusieurs appareils employés dans des domaines variés (minéralurgie, génie chimique, ...) dont la classification. Les trois phénomènes sont illustrés à la figure 4.9. Pour simplifier ces exemples, il est assumé que les particules ont toutes la même masse volumique et que la séparation est effectuée uniquement en fonction de la taille des particules.

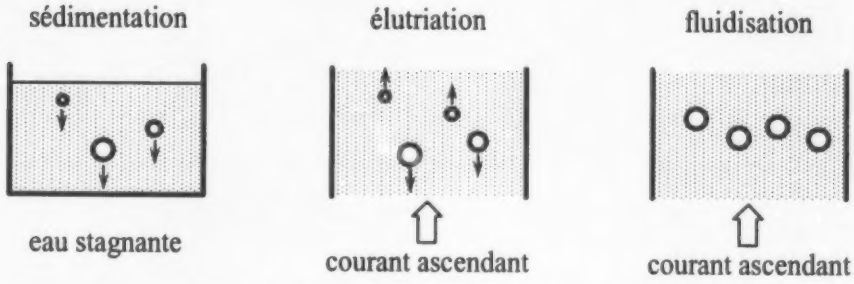


Figure 4.9 - La sédimentation, l'élutriation et la fluidisation

La classification s'applique lorsque qu'il est pas rentable au point de vue économique d'utiliser le tamisage. En effet, il a été vu que les équipements industriels de tamisage capables de séparer les particules de l'ordre des microns comme les tamis giratoires ont une très faible capacité (voir section 4.1.5). Généralement, la classification a pour but de restreindre l'alimentation d'un procédé de concentration à la gamme de tailles des particules qui est appropriée (Kelly et Spottishwood, 1982).

Les deux produits obtenus à la suite de la classification sont la surverse (traduction de overflow) et la sousverse (traduction de underflow). La surverse est composée des particules dont la vitesse terminale de chute est faible tandis que la sousverse est composée des particules dont la vitesse terminale de chute est élevée. Il est possible d'obtenir des produits intermédiaires en variant les conditions d'opération ou en employant une série d'appareils correctement agencés.

Il existe un grand nombre d'équipements de classification. Dans les classificateurs mécaniques, la séparation est effectuée par des moyens mécaniques tandis qu'elle est effectuée grâce aux forces gravitationnelles et centrifuges dans les classificateurs non-mécaniques. Des exemples de ces types de classificateurs seront présentés dans les sections suivantes, il s'agit du classificateur mécanique à vis, de l'hydrocyclone et du classificateur hydraulique (ou à lit fluidisé). Il existe plusieurs autres équipements de classification (exemple: le classificateur conique et la centrifugeuse) mais ces trois équipements sont de loin les plus fréquemment employés.

4.2.2 Le classificateur mécanique à vis

Les classificateurs mécaniques à vis utilisent la force mécanique afin de contrer la sédimentation des particules dont la vitesse terminale de chute est faible pour qu'elles demeurent en suspension alors que les particules dont la vitesse terminale de chute est élevée sédimentent. Ces équipements sont constitués d'une longue vis baignant dans un canal à fond incliné (voir figure 4.10). La force mécanique est communiquée par la rotation de la vis qui assure la turbulence de la pulpe ainsi que le transport des particules sédimentées. Les particules en suspension sont évacuées par la surverse.

L'étude de la figure 4.11 aide à la compréhension du principe de la classification accomplie dans cet appareil. La pulpe à traiter ne doit pas contenir plus de 30% de solides et elle est alimentée par le dessus du canal. Le classificateur mécanique à vis est divisé en trois zones distinctes. La zone de transport qui est située entre l'alimentation et la sortie de la surverse est caractérisée par la sédimentation libre des particules. La chicane qui divise cette zone a pour fonction d'en ajuster la profondeur et de dévier le parcours des particules en provenance de l'alimentation. Elle contribue aussi à augmenter l'effet de turbulence engendré par la rotation de la vis. La zone de classification qui est située sous la zone de transport est caractérisée par la

sédimentation entravée des particules. La troisième zone est celle des solides sédimentés qui est localisée complètement au fond du canal. Ces solides forment une couche hétérogène qui est constamment remuée et entraînée vers le haut par la vis. Ils sont transportés à un niveau supérieur à celui de la pulpe où ils subissent un lavage par jets d'eau qui a pour fonction de retourner dans la zone de sédimentation les particules fines qui ont été accidentellement entraînées par les autres particules.

Les principaux paramètres permettant de régler les conditions d'opération de ces appareils sont la vitesse de rotation de la vis, la valeur de la pente du canal ainsi que la densité de la pulpe. L'utilisation des classificateurs à vis est appropriée pour la séparation des particules dont la taille est plus petite que 25 mm et dont le point de coupure varie entre 45 µm et 1 mm. Ils bénéficient d'une bonne efficacité mais d'une capacité de 5 à 850 tonnes/heure sur une basse sèche (Kelly et Spottishwood, 1982). La capacité est fortement affectée par la taille des particules. Ces valeurs s'appliquent uniquement au traitement de minerai et peuvent varier pour les applications environnementales.

4.2.3 L'hydrocyclone

Il s'agit sans aucun doute de l'équipement le plus simple puisqu'il ne comporte aucune pièce mécanique ou mobile. Cet équipement de forme conique utilise la force centrifuge afin de séparer les particules. Les effets combinés de la forme spécifique de l'appareil ainsi que de la pression à laquelle est injectée la pulpe, sont à l'origine de la force centrifuge. Cette force étant plus puissante que la force due à l'attraction gravitationnelle, le temps requis pour accomplir la séparation est considérablement réduit. La figure 4.12 présente la section typique d'un hydrocyclone.

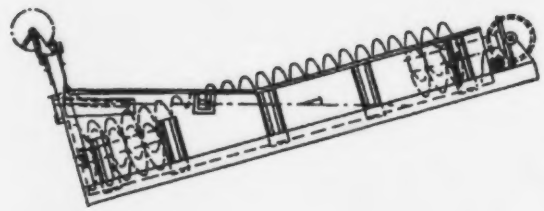


Figure 4.10 - Classificateur mécanique à vis (source: Blazy, 1970)

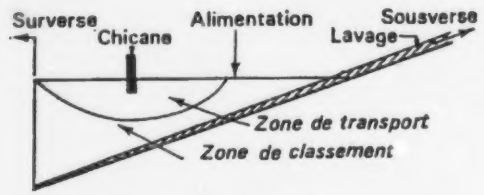


Figure 4.11 - Principe de classification (source: Blazy, 1970)

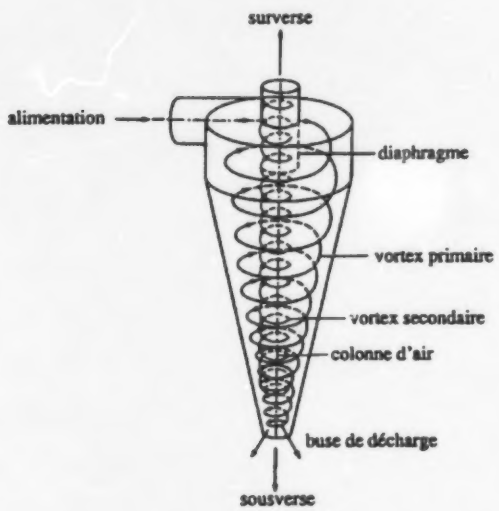


Figure 4.12 - Hydrocyclone (source: Coulson et Richardson, 1991)

La pulpe sous pression est injectée par le haut de l'hydrocyclone de façon tangentielle et emprunte une trajectoire en forme de spirale à l'intérieur de l'équipement. Les particules dont la vitesse terminale de chute est élevée sont entraînées vers les parois par la force centrifuge et sortent au bas du cône par la buse de décharge. Pour leur part, les particules dont la vitesse terminale de chute est faible sont circonscrites dans le centre de l'équipement. Lorsqu'elles atteignent le bas du cône, elles sont repoussées vers le haut et sortent par le dessus de l'appareil. Ce phénomène est dû à la présence d'un étranglement au bas du cône qui a pour fonction de repousser le courant de particules vers le haut où se trouve le diaphragme de sortie.

Les trois paramètres indépendants permettant de varier les conditions d'opération sont la densité de la pulpe, le débit et la pression de l'alimentation, le diamètre du diaphragme de sortie et le diamètre de la buse de décharge. Le point de coupure ainsi que l'efficacité de la séparation sont réglés en ajustant ces paramètres. Généralement, les hydrocyclones sont utilisés pour la classification des particules dont la taille est inférieure à 1400 µm et dont le point de coupure varie entre 5 µm et 300 µm. Ce sont des appareils peu dispendieux qui nécessitent très peu d'espace. Ils font preuve d'une très grande capacité, soit jusqu'à 20 m^3 de pulpe/minute, ainsi que d'une efficacité relativement élevée (Kelly et Spottishwood, 1982). Par contre, leur consommation d'énergie est élevée puisqu'il doivent être opérés à haute pression. La valeur de la capacité s'applique uniquement au traitement de minerai et peut varier pour les applications environnementales.

4.2.4 Le classificateur hydraulique (ou à lit fluidisé)

Les classificateurs hydrauliques sont généralement constitués d'une partie inférieure de forme conique coiffée d'une partie supérieure de forme cylindrique. Ils sont caractérisés par un ajout d'eau introduit à mi-hauteur qui produit un courant ascendant combattant la sédimentation des particules. Leur principe de séparation

peut reposer sur la sédimentation libre ou sur la sédimentation entravée. Cependant, les appareils à sédimentation entravée sont les plus communément employés et les trois phénomènes décrits à la figure 4.9 (sédimentation, élutriation et fluidisation) s'y produisent simultanément. La figure 4.13 illustre le principe global de fonctionnement d'un classificateur hydraulique.

La pulpe alimentant le classificateur peut contenir entre 35% et 65% de solides sur une base massique et elle est introduite par un puits d'alimentation qui la disperse de façon radiale pour éviter de perturber les conditions établies dans l'appareil. L'eau est introduite par le bas de la partie cylindrique de l'appareil et elle engendre un courant ascendant de vitesse contrôlée. Immédiatement au-dessus, le lit de particules fluidisées est constitué des particules dont la vitesse terminale de chute est la même que la vitesse du courant d'eau ascendant. Grâce à l'abondance de particules en suspension, le lit forme un milieu de densité contrôlée et d'une valeur plus élevée que celle de l'eau. La séparation des particules est accomplie par élutriation. Le courant ascendant entraîne les particules dont la vitesse terminale de chute est inférieure à sa vitesse. Ces particules sont entraînée vers le haut de l'appareil et sont évacuées par débordement (surverse). Les particules dont la vitesse terminale de chute est supérieure à la vitesse du courant ascendant sont entraînées par gravité dans la direction opposée, c'est-à-dire vers le bas. Le bas de la partie conique du classificateur constitue une zone de compactage des particules qui a pour fonction de réduire la teneur en eau de la sousverse. Cette dernière est évacuée de l'appareil par une vanne à contrôle pneumatique.

La densité du lit de particules fluidisées est ajustée et contrôlée à l'aide de deux détecteurs de pression dont la valeur différentielle est communiquée à un panneau de contrôle. La densité effective du lit est déterminée à l'aide de la différence de pression et de la distance entre les deux détecteurs. Les perturbations des conditions prévalant à l'intérieur de l'appareil sont éliminées par l'activation de la vanne

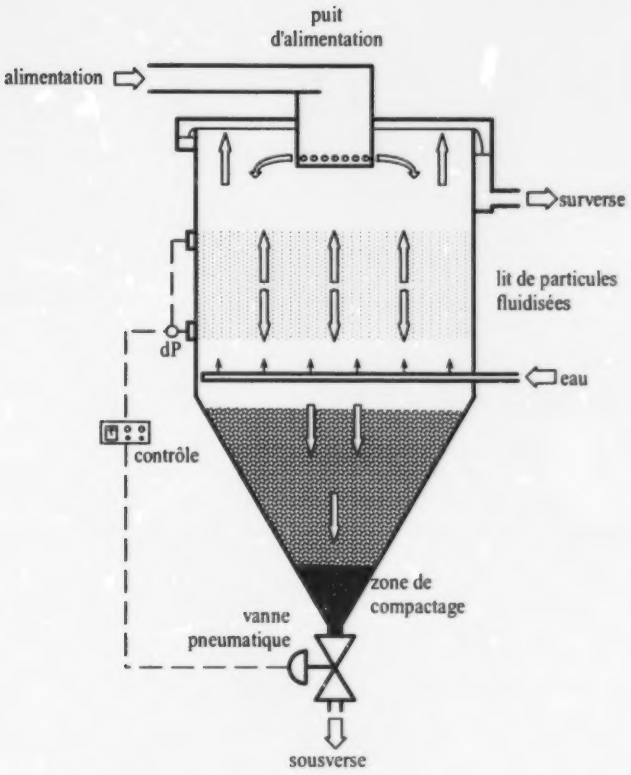


Figure 4.13 - Classificateur hydraulique

d'évacuation de la sousverse. Ces perturbations peuvent être engendrées par des variations de débit ou de composition de la pulpe d'alimentation.

Les principaux paramètres permettant de régler les conditions d'opération de ces appareils sont le débit de l'ajout d'eau et le débit d'évacuation de la sousverse. L'utilisation des classificateurs hydrauliques est appropriée pour la séparation des particules dont la taille est plus petite que 6 mm et dont le point de coupure varie entre 100 µm et 850 µm. Ils bénéficient d'une bonne efficacité mais d'une capacité restreinte de 10 à 120 tonnes/heure sur une basse sèche (Kelly et Spottishwood,

1982). Ces valeurs s'appliquent uniquement au traitement de minerai et peuvent varier pour les applications environnementales.

4.2.5 Conditions d'application

Les sections précédentes ont fait état des points de coupure en fonction de l'utilisation des appareils qui ont été décrits. Le tableau suivant résume ces conditions d'application en détaillant l'efficacité et la capacité de chaque appareils.

Tableau 4.2 - Application typique des appareils de classification

Appareil	Point de coupure	Efficacité	Débit	Capacité
Classificateur à vis	45 µm à 1 mm	bonne	5-850 t/h	variable
Hydrocyclone	5 µm à 300 µm	élevée	< 20 m^3/min	élevée
Classificateur hydraulique	100 µm à 850 µm	bonne	10-120 t/h	faible

4.3 La concentration gravimétrique

4.3.1 Principes

Les équipements de concentration gravimétrique exploitent la différence de masse volumique entre les matériaux pour accomplir la séparation grâce à l'action combinée de la gravité et de différentes forces. En réalité, la séparation est aussi affectée par le volume et la forme des particules comme dans le cas de la classification. Les effets de ces deux facteurs sont contrés en limitant la gamme de tailles de particules qui composent l'alimentation de ces équipements par tamisage ou classification.

Comme la classification, la concentration gravimétrique est effectuée dans l'eau de préférence. L'air est utilisé dans certains cas (tables à air) mais grâce à sa masse volumique plus élevée, l'eau est un meilleur fluide pour effectuer la séparation. Les phénomènes qui gouvernent la séparation par concentration gravimétrique sont les mêmes que ceux qui gouvernent la classification (sédimentation, élutriation et fluidisation). D'ailleurs, il est important de souligner le fait que sous certaines conditions des équipements de classification peuvent être utilisés comme concentrateurs gravimétriques et vice versa (Spottishwood et Kelly, 1982).

Sous l'action de la gravité et/ou d'une autre force, les particules baignant dans le fluide (l'eau) entrent en mouvement les unes par rapport aux autres afin de créer deux couches distinctes: celle rassemblant les particules de faible masse volumique et celle rassemblant les particules de masse volumique élevée. Les équipements de concentration gravimétrique sont divisés en quatre groupes selon les mécanismes de séparation impliqués. Ces mécanismes sont illustrés à la figure 4.14.

Le mécanisme impliquant la densité fait intervenir la **masse volumique (densité)** du fluide ou de la pulpe ainsi que la force gravitationnelle pour séparer les particules en deux produits, ceux qui flottent et ceux qui coulent. Le point de coupure (en terme de masse volumique) entre les deux produits peut être modifié en ajustant la densité de la pulpe par la quantité de solides présents. La séparation est alors effectuée par sédimentation entravée (voir section 4.2.1). Parmi les équipements de ce groupe, les équipements de séparation par milieu dense sont les plus utilisés. Cependant, le processus de séparation est considérablement allongé lorsque la taille des particules devient trop fine. Dans ces circonstances, la force centrifuge est employée pour accomplir la séparation puisqu'elle peut être beaucoup plus élevée que la force gravitationnelle. Le cyclone à milieu dense et le séparateur tubulaire à milieu dense font aussi partie de ce groupe d'équipements.

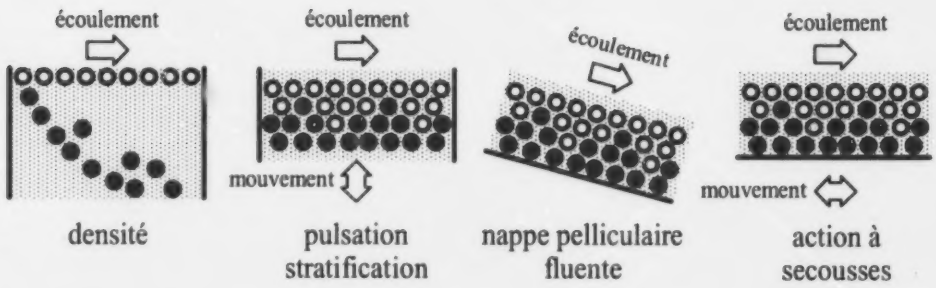


Figure 4.14 - Les mécanismes de séparation

Le mécanisme qui fait intervenir **la pulsation et la stratification** repose sur l'action de pulsations oscillatoires verticales d'un courant d'eau. Ce mécanisme engendre l'expansion du lit qui facilite le mouvement des particules les unes par rapport aux autres. Ce mouvement provoque la stratification des particules en fonction de leur masse volumique (Plumpton, 1996). Les jigs constituent les principaux équipements de ce groupe.

Les séparateurs à **nappe pelliculaire fluente** sont basés sur l'action de percolation interstitielle à travers un lit de particules en écoulement sur un plan incliné. Les particules de masse volumique élevée ont tendance à traverser le lit pour former une couche de particules inférieure qui s'écoule lentement le long du plan incliné. La couche supérieure qui est composée des particules de faible masse volumique s'écoule plus rapidement puisque ces particules sont facilement entraînées par le courant liquide et ne subissent pas la friction occasionnée par la surface inclinée (Wills, 1988). Parmi les équipements de ce groupe, les spirales se distinguent grâce à un effet additionnel de force centrifuge engendré par leur configuration spécifique.

L'action de secousses horizontales combinée à l'action de la nappe pelliculaire fluente contribuent aussi à obtenir la stratification désirée. Grâce à la force de cisaillement qu'elles engendrent, les secousses contribuent principalement à produire le vide intergranulaire nécessaire au mouvement des particules. Les tables à

secousses sont au nombre des équipements dont le fonctionnement repose sur un tel mécanisme.

Il existe des équipements dont le principe de fonctionnement est basé sur l'action combinée de plusieurs phénomènes. C'est le cas du concentrateur Knelson et du séparateur MGS Mozley qui sont décrits à la suite des équipements dont il a été question jusqu'à présent.

L'utilisation des équipements de concentration gravimétrique est applicable à la décontamination de matrices comportant exclusivement des substances contaminantes en phase solide. D'une façon générale, il s'agit de composés inorganiques tels que des métaux sous forme métallique, oxydée ou sulfurée. Comme les substances contaminantes d'origine organique se présentent généralement sous phase liquide, il est impossible d'utiliser ce genre d'équipements pour les concentrer sauf si elles sont associées à une phase solide spécifique. Par exemple, les BPC ont tendance à s'adsorber sur la matière organique comme des copeaux de bois.

D'une façon générale, les équipements de concentration gravimétrique séparent efficacement les particules dont la taille se situe à l'intérieur d'une gamme restreinte. Pour cette raison, il est nécessaire de procéder à une classification du matériel avant d'effectuer la séparation par concentration gravimétrique. La classification a pour but de retirer les particules dont la taille de convient pas au traitement subséquent. La concentration gravimétrique sépare alors les particules en fonction de la masse volumique et s'applique en fonction de la différence des masses volumiques des matériaux. En effet, il est possible d'estimer l'applicabilité d'une telle approche à l'aide de la formule suivante:

$$\text{Critère de concentration} = (\rho_H - \rho_M) / (\rho_L - \rho_M)$$

où ρ_H représente la masse volumique de la phase solide lourde, ρ_L la masse volumique de la phase solide légère et ρ_M la masse volumique du liquide (Weiss,

1985). L'eau constitue habituellement le liquide dans lequel baignent les particules. Telle que présentée au tableau 4.3, la valeur du critère de concentration indique l'applicabilité de la concentration gravimétrique en fonction de la taille des particules.

Tableau 4.3 - Critère de concentration gravimétrique en fonction de la taille des particules

Critère	Applicabilité
> 2,5	Séparation facile pour les particules de 200 mailles et plus
2,5-1,75	Séparation efficace jusqu'à 100 mailles
1,75-1,50	Séparation possible mais difficile jusqu'à 10 mailles
1,50 à 1,25	Séparation possible mais difficile jusqu'à ¼ de pouce
< 1,25	Séparation presque impossible

Source: Weiss, 1985

Les équipements dont il a été question dans les paragraphes précédents sont tous présentés dans les sections qui suivent.

4.3.2 Les séparateurs par milieu dense

La séparation par milieu dense a été développée à partir de la séparation par liquide lourd qui a été abordée dans la section 3.3.3. Cependant, la séparation par liquide lourd nécessite l'emploi de liquides dont la toxicité et le coût rendent leur utilisation difficile ou impossible à l'échelle industrielle. Le milieu de séparation utilisé à une telle échelle est plutôt constitué d'une suspension de particules fines et denses (masse volumique élevée) dans l'eau formant une pulpe de masse volumique apparente intermédiaire à celles des particules à séparer (voir figure 4.15).

La gravité qui agit sur les solides de masse volumique différente est l'unique mécanisme à l'aide duquel la séparation est accomplie. La masse volumique (m.v.) de la pulpe formant le milieu de séparation est fonction de la taille et la composition des particules suspendues dans l'eau. La magnétite et le ferrosilicium constituent les

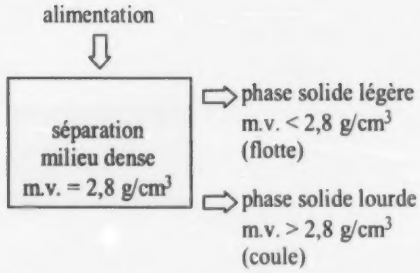


Figure 4.15 - Principe de la séparation par milieu dense

matériaux les plus fréquemment employés. La magnétite (masse volumique = 5,1 g/cm^3) est essentiellement utilisée dans la préparation du charbon alors que le ferrosilicium (masse volumique = 6,8 g/cm^3) est utilisé pour le traitement de nombreux minerais. Ces deux produits sont disponibles en différents calibres (ou grades) se distinguant par la taille des particules. Avec la magnétite, il est possible de composer des milieux de séparation dont la masse volumique apparente se situe autour de 2,5 g/cm^3. D'autre part, il est possible de composer avec le ferrosilicium des milieux de séparation dont la masse volumique apparente varie entre 2,5 et 4,0 g/cm^3. Les deux produits sont facilement récupérés par séparation magnétique, ce qui permet de les réutiliser (Gill, 1991).

La séparation par milieu dense est le procédé de concentration gravimétrique qui nécessite la moins grande différence entre les masses volumiques, soit aussi peu que 0,1 g/cm^3 (Gill, 1991). Il existe deux principaux types d'équipements de séparation par milieu dense: les séparateurs coniques et les séparateurs à tambour. Les séparateurs coniques (figure 4.16) sont recommandés pour la séparation des particules de taille inférieure à 10 cm et disposent d'une capacité s'élevant jusqu'à 500 t/h.

Pour leur part, les séparateurs à tambour sont recommandés pour la séparation des particules de taille inférieure à 30 cm et disposent d'une capacité s'élevant jusqu'à 450 t/h (Wills, 1988). Cependant, l'application la plus courante des séparateurs à milieu dense se situe dans la séparation des particules dont le taille varie entre 2,5 et

5 cm (Gill, 1991). Les particules fines, comme les argiles, doivent être préalablement retirées de l'alimentation par tamisage ou classification.

Par ailleurs, le classificateur hydraulique (section 4.2.4) peut accomplir la même fonction qu'un séparateur à milieu dense lorsque la gamme de taille de particules n'est pas très étendue, soit entre 100 µm et 5 mm (Plumpton, 1996).

4.3.3 Le cyclone et le séparateur tubulaire à milieu dense

Le cyclone à milieu dense est composé d'un hydrocyclone conventionnel (section 4.2.3) et son principe de fonctionnement est essentiellement le même. Par contre, le matériel à séparer est préalablement suspendu dans un milieu dense adéquat (magnétite ou ferrosilicium) et le cyclone doit être installé selon un angle variant entre 14° et 25° par rapport à l'horizontale (Weiss, 1985). Cet appareil permet de traiter des particules dont la taille est comprise entre 0,5 et 40 mm. Leur capacité qui varie en fonction du diamètre de l'équipement peut s'élever jusqu'à 100 t/h pour un cyclone de 0,6 m de diamètre (Burt, 1984).

Le séparateur tubulaire à milieu dense (Dyna Whirlpool) fonctionne à l'aide du même principe que le cyclone à milieu dense. Cependant, sa géométrie est différente car cet appareil comporte uniquement une section cylindrique légèrement inclinée par rapport à l'horizontale comme l'illustre la figure 4.17.

Le milieu dense est introduit sous pression et de façon tangentielle au bas du cylindre tandis que le matériel à séparer est introduit par le haut dans la même direction que l'axe du cylindre. À l'intérieur de l'appareil, le milieu dense suit une trajectoire ascendante hélicoïdale créant par la même occasion un vortex qui s'étend sur toute la longueur. Les particules légères (m.v. inférieure à celle du milieu dense) flottent à la surface du vortex et sortent directement au bas du cylindre. Les particules lourdes

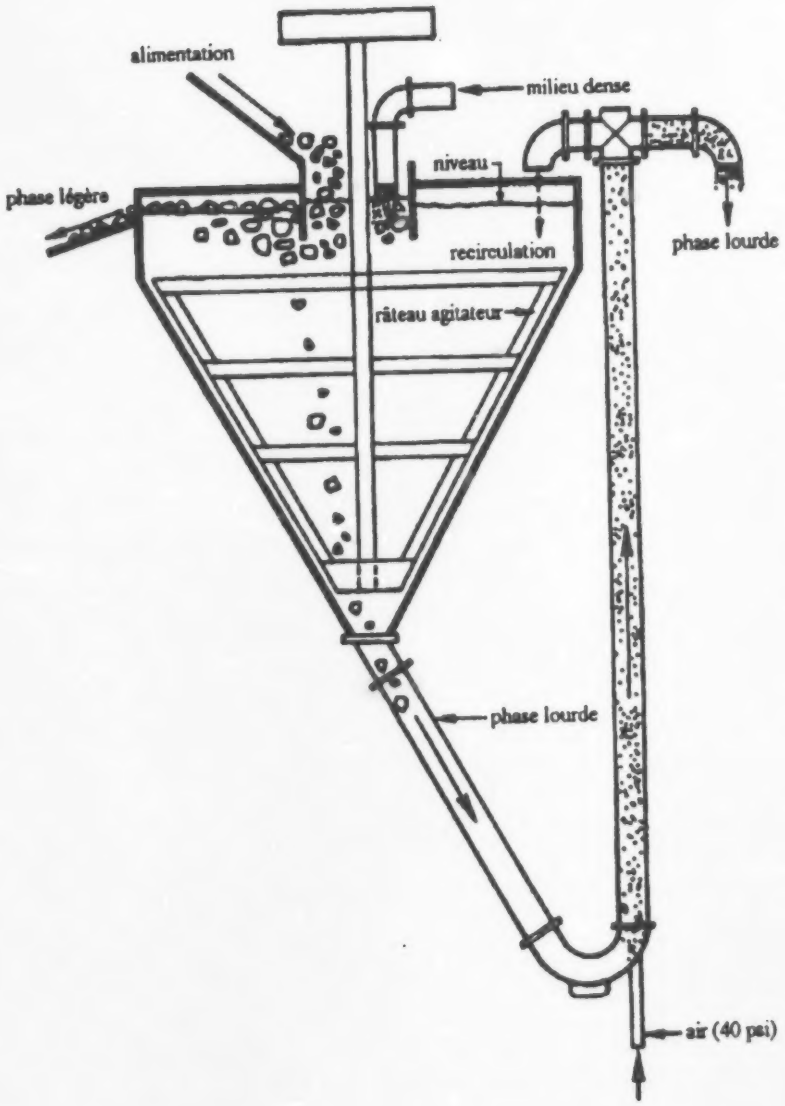


Figure 4.16 - Séparateur conique à milieu dense (source: Gill, 1991)

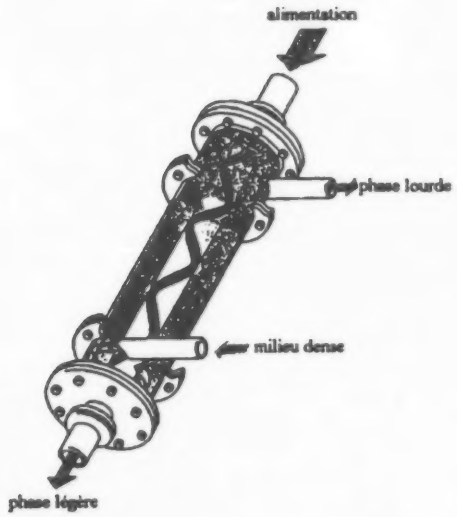


Figure 4.17 - Séparateur tubulaire à milieu dense (source : Wills 1988)

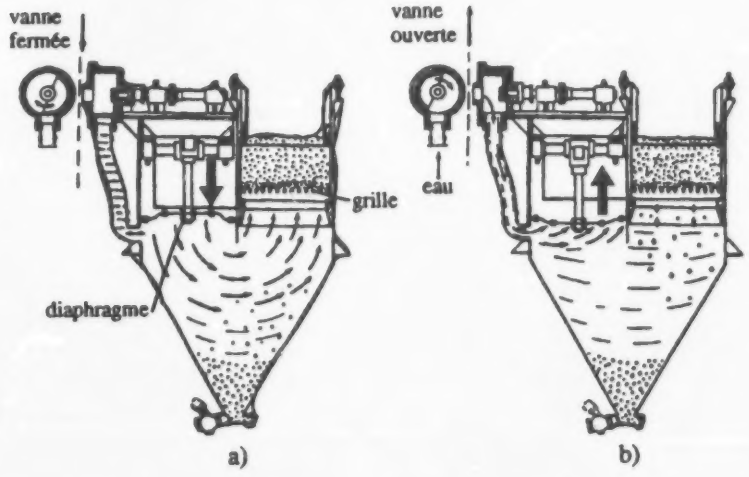


Figure 4.18 - Jig à grille fixe Denver (source: Coulson et Richardson, 1991)

a) pulsion, b) succion

(m.v. supérieure à celle du milieu dense) pénètrent au travers du milieu dense jusqu'à la paroi de l'appareil et sont entraînées vers le haut par le mouvement du vortex. Le mélange de milieu dense et de particules lourdes est évacué par une sortie tangentielle située dans la partie supérieure. Comme cette sortie est localisée près de l'entrée de l'alimentation, les particules lourdes sont très rapidement soutirées de l'appareil en réduisant les possibilités d'usure de l'appareil.

Le séparateur tubulaire à milieu dense est conçu pour traiter des particules dont la taille est comprise entre 0,5 et 30 mm (Wills, 1988). Le diamètre du cylindre varie entre 150 et 470 mm et sa longueur doit être au moins cinq fois supérieure au diamètre. La capacité de cet appareil varie aussi en fonction du diamètre et peut s'élever jusqu'à 100 t/h (Burt, 1984).

4.3.4 Les jigs

Le principe de fonctionnement des jigs repose sur l'action de courants d'eau successivement ascendants (pulsion) puis descendants (succion) qui circulent à travers un lit de particules. Dans un premier temps, le lit de particules qui repose sur une grille est soumis à un courant d'eau ascendant qui a pour effet de fluidisé le lit de particules tout en le dilatant. Ensuite, le courant d'eau descendant entraîne les particules vers la grille tout en produisant un compactage du lit. La stratification des particules débute par la présence de grosses particules denses dans le bas du lit qui sont par la suite ensuite rejointes par les petites particules denses. En effet, la dilatation du lit permet aux petites particules denses de se mouvoir vers le bas avec plus de facilité sous l'effet du courant d'eau descendant (Wills, 1988). Le résultat de la stratification consiste en la formation de deux couches distinctes dont l'une est composée des particules de masse volumique élevée (couche inférieure) et l'autre des particules de masse volumique faible (couche supérieure). Le principal phénomène responsable de la séparation des particules est donc la sédimentation entravée.

Il existe deux types d'équipements industriels, soit les jigs à grille fixe et les jigs à grille mobile. Un diaphragme ou un piston assure la pulsion et la succion du liquide dans les jigs à grille fixe. Dans les jigs à grille mobile, la pulsion et la succion du liquide sont engendrées par le mouvement alternatif de haut en bas de la grille par un système mécanique (Blazy, 1970). La figure 4.18 présente le fonctionnement d'un jig à grille fixe Denver durant la phase de pulsion en a) et durant la phase de succion en b).

Les jigs sont habituellement utilisés pour le traitement de particules relativement grosses, soit entre 0,5 et 200 mm (Kelly et Spottishwood, 1988). Cependant, la limite inférieure peut être abaissée à 0,1 mm dans certaines applications spécifiques (Burt, 1984) mais la capacité est réduite par la même occasion. La qualité de la séparation est nettement supérieure lorsque la gamme de tailles des particules constituant l'alimentation est étroite et exempte de particules fines (Wills, 1988). Il est donc important de procéder à une classification du matériel avant le traitement afin de le séparer en plusieurs tranches granulométriques distinctes, chaques tranches étant éventuellement traiter adéquatement en ajustant les paramètres d'opération des jigs. Pour terminer, la capacité des jigs peut s'élever jusqu'à 25 t/h (Blazy, 1970).

4.3.5 Les spirales

Les spirales sont des équipements particulièrement simples à opérer puisqu'elles ne comportent aucune pièce mécanique à l'exception d'une pompe qui sert à l'alimentation de la pulpe. Cet équipement est composé d'un conduit hélicoïdal dont la section est demi-circulaire (figure 4.19). La pulpe est introduite par le haut de la spirale et suit une trajectoire hélicoïdale jusqu'au bas durant laquelle il se produit une stratification de la pulpe. Son principe de séparation est basé sur les effets combinés de la gravité, de la force centrifuge, de la friction ainsi que de la sédimentation entravée au travers du lit de particules en écoulement (Gill, 1991).

Durant leur descente dans la spirale, les particules denses tendent à se concentrer dans une bande située près du centre de la spirale alors que les particules moins denses empruntent une trajectoire plus large résultant de leur vitesse tangentielle plus élevée. La figure 4.20 présente une section de spirale qui indique où se concentrent les particules en fonction de leur masse volumique respective.

L'eau de lavage qui est alimentée par le haut de la spirale contribue à balayer les particules les moins denses et à les entraîner au bas de la spirale où elles sont collectées. Les particules dont la masse volumique est élevée sont soutirées dans la partie supérieure de la spirale. Ces particules s'accumulent rapidement dans la bande située près du centre car leur mouvement est peu influencé par le courant d'eau de lavage. Elles sont donc soutirées de la pulpe en écoulement par des collecteurs situés près du haut de la spirale. Un mélange de particules mixtes comportant à la fois des particules légères et des particules lourdes est soutiré par des collecteurs situés dans la partie inférieure de la spirale. Les particules mixtes sont habituellement recirculées dans la spirale (Gill, 1991).

L'utilisation des spirales s'applique essentiellement aux particules sablonneuses dont le diamètre est compris entre 75 µm et 3 mm (Wills,1988). La qualité de la séparation est supérieure lorsque la gamme de tailles des particules constituant l'alimentation est étroite et que la différence entre les masses volumiques des matériaux à séparer est égale ou supérieure à 1 g/cm^3. En conséquence, il est important de procéder à une classification du matériel avant le traitement. La capacité des spirales à pente douce s'étend de 1 à 2,9 t/h et celle des spirales à pente plus prononcée s'étend de 2 à 6 t/h (Gill, 1991). La capacité est généralement augmentée en multipliant le nombre d'équipements.

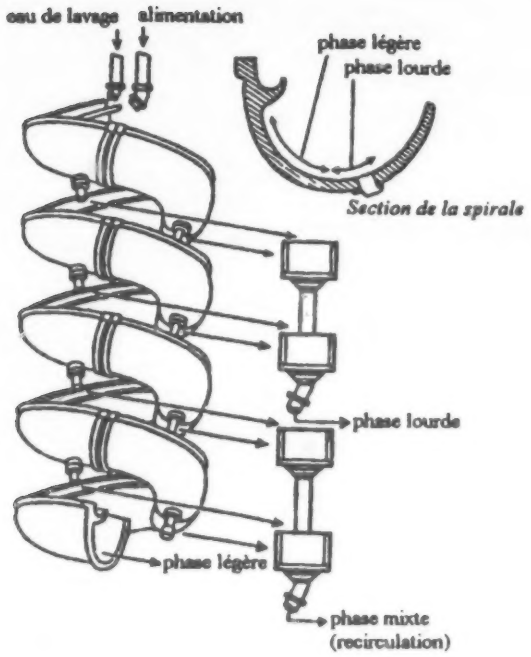


Figure 4.19 - Vue d'ensemble et section d'une spirale (source: Gill, 1991)

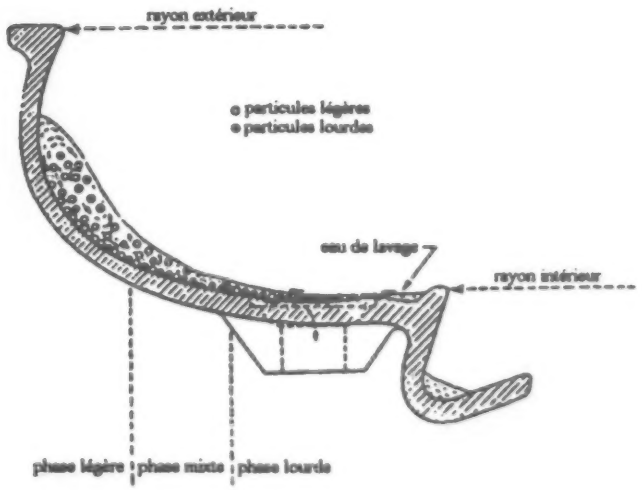


Figure 4.20 - Localisation des particules en fonction de leur masse volumique (source: Gill, 1991)

4.3.6 Les tables à secousses

Les tables à secousses sont composées d'une table légèrement inclinée (réglable de 0° à 6°) dans le sens de la largeur et équipée d'un mécanisme qui lui communique longitudinalement un mouvement de va-et-vient asymétrique. L'amplitude et la vitesse de ce mouvement sont aussi réglables (Gill, 1991). La surface de la table est couverte de rainures longitudinales et parallèles dont la profondeur diminue progressivement à partir du point d'alimentation de la pulpe jusqu'à la sortie qui est diamétralement opposée (figure 4.21). L'eau de lavage qui s'écoule sur la table entraîne les particules légères dans la direction transversale (vers le bas).

La stratification des particules entre les rainures se produit sous l'action des secousses et du courant d'eau de lavage. Les secousses contribuent à dilater le lit de particules afin de permettre aux grosses particules denses de le traverser jusqu'à la surface de la table. L'effet des secousses entraîne la formation de deux couches de particules distinctes dont l'une est composée des particules de masse volumique élevée (couche inférieure) et l'autre des particules de masse volumique faible (couche supérieure). La stratification obtenue est identique à celle qui se produit dans les jigs. Les particules légères sont entraînées par l'eau de lavage jusqu'au bas de la pente de la table où elles sont collectées (Blazy, 1970). Les différentes phases décrivant la progression de la stratification sont illustrées à la figure 4.22.

Les particules lourdes sont acheminées longitudinalement à l'autre extrémité de la table grâce à la direction et à la nature asymétrique des secousses. La figure 4.23 présente une vue en plan d'une table à secousses accompagnée de la répartition des différents produits récupérés en fonction de leur masse volumique.

À l'aide de collecteurs réglables, la bordure longitudinale permet de récupérer deux produits différents dont l'un consiste en un concentré de grosses particules de masse volumique faible et l'autre en un mélange de particules mixtes et de petites particules

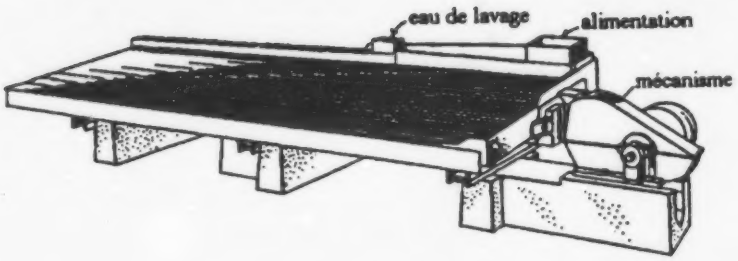


Figure 4.21 - Vue en perspective d'une table à secousses (source: Taggart, 1951)

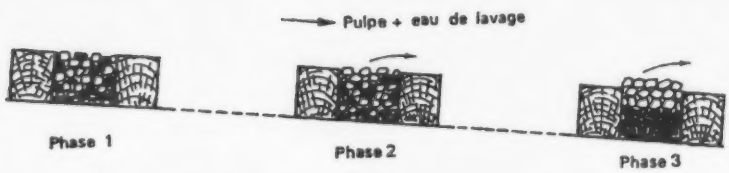


Figure 4.22 - Progression de la stratification entre deux rainures (source: Blazy, 1970)

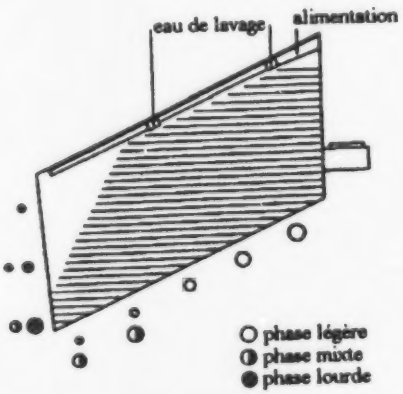


Figure 4.23 - Répartition des produits récupérés en fonction de leur masse volumique (source : Wills, 1988)

légères. De la même façon, il est possible de récupérer le long de la bordure transversale deux produits différents. L'un d'eux comporte un concentré de fines particules denses alors que l'autre est constitué de grosses particules denses mélangées à des particules mixtes (Blazy, 1970).

Les tables à secousses sont employées pour le traitement des particules dont le diamètre varie entre 75 µm et 4,75 mm (Gill, 1991). Leur capacité varie principalement en fonction de la taille des particules à séparer. Par exemple, la capacité d'une table Wilfley est d'environ 4 t/h pour des grains de 2,5 mm et d'environ 0,4 t/h pour des grains de 100 à 400 µm (Blazy, 1970). Pour une séparation efficace, la différence entre les masses volumiques des particules denses et des particules légères doit être au moins de 1 g/cm^3 (Weiss, 1985).

4.3.7 Le concentrateur Knelson

Le concentrateur Knelson est un appareil compact à effet centrifuge qui a été initialement développé pour la concentration de l'or. Cet appareil comporte une paroi extérieure formant son enveloppe et une paroi intérieure perforée permettant le passage de jets d'eau (figure 4.24). L'axe de transmission de la rotation est creux afin d'acheminer l'eau jusqu'à la paroi intérieure. La surface interne de cette paroi est tapissée de bandes horizontales qui ont pour fonction de piéger les particules lourdes. La vitesse de rotation élevée permet de développer une force centrifuge qui peut surpasser de 50 fois la force gravitationnelle. L'action combinée de la force centrifuge et des jets d'eau engendre la formation d'un lit fluidisé à l'intérieur duquel sont capturées les particules lourdes (Wills, 1988). Leur vitesse terminale de chute étant trop faible, les particules légères ne sont pas capturées par le lit fluidisé mais sont entraînées par le courant d'eau.

Jusqu'à maintenant, le concentrateur Knelson a été utilisé pour la concentration de particules d'or ultrafines, pour la concentration du fer et pour la préparation du charbon (Knelson, 1992) mais son utilisation peut aisément s'étendre aux applications

environnementales Ce type d'appareil est approprié pour traiter les particules fines ayant un diamètre qui varie de 10 à 100 µm, cependant, il présente une capacité assez faible ne s'élevant guère au-dessus de 36 t/h (Knelson, 1992). Il existe deux appareils dont le principe de fonctionnement est comparable au concentrateur Knelson : le concentrateur Super Bowl et le concentrateur Falcon. Cependant, leurs conditions d'opération et d'application peuvent varier quelque peu.

4.3.8 Le séparateur MGS Mozley

Le séparateur MGS Mozley est un équipement qui a été conçu récemment pour le traitement des particules fines. Il peut être figuré en roulant la surface horizontale d'une table à secousse conventionnelle (voir section 4.3.6) à l'intérieur d'un cylindre légèrement incliné et animé d'un mouvement rotatif qui engendre une force centrifuge beaucoup plus élevée que la force gravitationnelle. La séparation est obtenue grâce à l'action combinée de la force centrifuge et des différentes forces produites par les secousses sinusoïdales d'amplitude et de fréquence variables (Traoré et al., 1993). La vitesse de rotation du cylindre peut être modifiée afin de développer une force centrifuge 5 à 15 fois plus élevée que la force gravitationnelle (Wills, 1988). La figure 4.25 présente une vue en perspective du séparateur MGS Mozley.

La pulpe est introduite presque au centre du cylindre et de l'eau de lavage est ajoutée dans le haut de la pente du cylindre. À cause de la rotation du cylindre, la pulpe suit une trajectoire en forme de spirale à l'intérieur de celui-ci. Les particules lourdes traversent la couche de pulpe et se collent contre la paroi du cylindre sous l'action de la force centrifuge. Un système d'éléments racleurs contribue à acheminer ces particules vers le haut de la pente du cylindre. Les particules légères sont entraînées au bas de la pente par le courant d'eau de lavage. Pour leur part, les secousses causent la stratification des particules contribuant ainsi à libérer les particules légères qui peuvent être emprisonnées dans la couche de particules lourdes (Traoré et al., 1993).

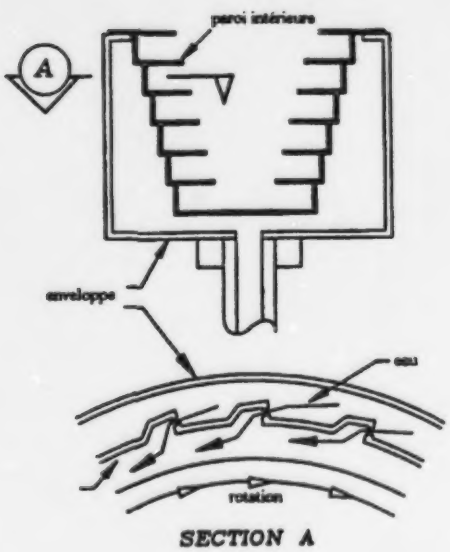


Figure 4.24 - Concentrateur Knelson (source: Knelson, 1992)

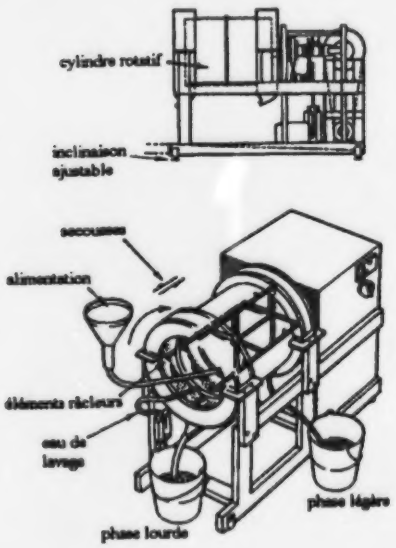


Figure 4.25 - Séparateur MGS Mozley (source :Wills, 1988)

Le séparateur MGS Mozley est disponible sous la forme d'unité pilote d'une capacité maximale de 200 kg/h et d'unité industrielle d'une capacité maximale de 5 t/h (Traoré et al., 1993). Cette technologie est applicable aux particules dont la différence entre les masses volumiques est au moins de 1 g/cm^3 et dont le diamètre varie entre 1 µm et 1,0 mm (selon les spécifications du fabricant de l'appareil).

4.3.9 Conditions d'application

L'utilisation des équipements qui ont été décrits précédemment est limitée par des conditions spécifiques quant à l'intervalle granulométrique à l'intérieur duquel ces équipements fonctionnent de façon efficace. Le tableau suivant résume ces conditions d'application et présente la capacité maximale de chaque équipement accompagnée de son appréciation qualitative. Les unités de capacité dont il est question dans ce tableau doivent être interprétées comme des tonnes métriques de solide sec par heure. De plus, les valeurs de capacité s'appliquent uniquement au traitement de minerai et peuvent varier pour les applications environnementales.

Tableau 4.4 - Application et capacité des appareils de concentration gravimétrique

Appareil	Intervalle granulométrique	Capacité maximale	Appréciation de la capacité
Séparateur par milieu dense	2,5 à 5 cm	500 t/h	élevée
Cyclone à milieu dense	0,5 à 40 mm	100 t/h	moyenne
Séparateur tubulaire	0,5 à 30 mm	100 t/h	moyenne
Concentrateur Knelson	10 à 100 µm	36 t/h	faible
Séparateur MGS Mozley	1 µm à 1 mm	5 t/h	très faible
Jig	0,5 à 200 mm	25 t/h	faible
Spirale	75 µm à 3 mm	6 t/h	très faible
Table à secousses	75 µm à 4,75 mm	4 t/h	très faible

4.4 La flottation

4.4.1 Principes

La flottation est, sans aucun doute, le procédé le plus important parmi les différentes techniques employées pour le traitement de minerai. Cette technique polyvalente permet le traitement de plusieurs minerais complexes (plomb-zinc, cuivre-zinc, ...), de sulfures (cuivre, plomb, zinc, ...), d'oxydes (hématite, cassitérite, ...), de minéraux oxydés (malachite, cérusite, ...) et même de minerais non-métalliques (fluorite, phosphates, charbon, ...). Grâce à la flottation, il est possible de concentrer de façon économique des minerais pauvres dont le traitement ne serait pas rentable en utilisant les techniques de concentration gravimétrique (Wills, 1988).

Les applications environnementales de la flottation sont très vastes. La plupart des contaminants inorganiques de nature métallique (cuivre, zinc, ...) peuvent être concentrés par flottation. De même, les contaminants organiques à caractère hydrophobe comme les hydrocarbures pétroliers (HC_x), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les biphényles polychlorés (BPC) peuvent être concentrés de la même façon. Une des sections suivantes traitera spécialement de cette dernière application.

Le principe de la flottation est basé sur les propriétés hydrophobes et hydrophiles des surfaces des solides. Ces propriétés peuvent être naturelles ou stimulées à l'aide d'un réactif approprié qui est ajouté dans l'eau où baignent les particules solides. Lorsque de l'air est introduit sous forme de petites bulles dans un tel milieu, il se produit un transport sélectif des particules hydrophobes. Les particules présentant des surfaces hydrophobes se fixent aux bulles d'air lorsqu'elles entrent en collision avec elles (figure 4.26). Ce phénomène est dû à la grande affinité des surfaces hydrophobes pour l'air dont la nature est non-polaire. Les bulles d'air entraînent ces particules jusqu'à la surface de la pulpe où elles forment une mousse chargée. Par contre, les

particules présentant des surfaces hydrophiles ne se lient pas aux bulles d'air et restent en suspension dans la pulpe (Blazy, 1970).

Les produits de la flottation sont le concentré et le rejet. La couche de mousse qui flotte sur le dessus du liquide et qui est chargée de substances contaminantes constitue le concentré. La pulpe restante constitue le rejet qui est composé de la matrice décontaminée.

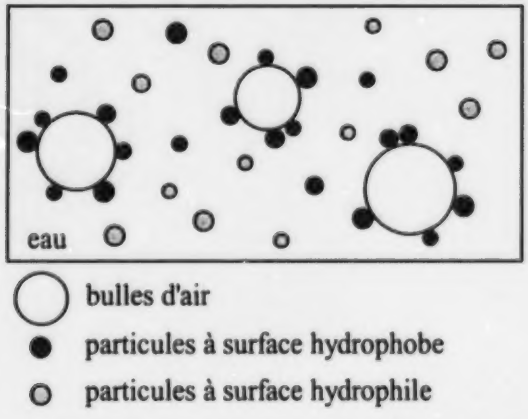


Figure 4.26 - Fixation des particules à surface hydrophobe aux bulles d'air

La pulpe doit être préparée adéquatement en fonction des substances à concentrer et cette préparation repose principalement sur l'ajout de différents agents. Les moussants, les collecteurs, les déprimants et les activants sont des réactifs de flottation. La stabilité de la mousse est assurée par les moussants. Les collecteurs ont pour fonction d'adhérer aux surfaces afin de les rendre hydrophobes alors que les déprimants rendent les surfaces hydrophiles. Les activants altèrent les surfaces des particules afin de les rendrent plus susceptibles à l'action d'un collecteur. L'activité de la plupart de ces réactifs dépend du pH du milieu, il est donc important de corriger la valeur du pH en fonction des réactifs utilisés.

Les principaux équipements de flottation sont la cellule de flottation et la colonne de flottation. Les circuits de flottation sont aussi composés de réservoirs de conditionnement et de cellules d'attrition qui servent à la préparation de la pulpe. Naturellement, des pompes sont nécessaires au transport de la pulpe d'un équipement à l'autre. Les particularités de ces équipements sont décrites dans les sections qui suivent.

L'utilisation de la flottation est appropriée pour le traitement de particules dont la taille est comprise entre 5 et 212 µm. Cependant, pour les minéraux légers comme le charbon la limite supérieure est élevée à 1,70 mm (Gill, 1991). La limite supérieure est dictée par la capacité limitée d'une bulle à soulever un poids. À masse volumique égale, la flottation des grosses particules nécessite des bulles plus volumineuses que la flottation de petites particules (Jones et Woodcock, 1984). Cette limite est aussi imposée par le détachement des grosses particules de la bulle à laquelle elles sont accrochées. Le détachement est causé par les forces de friction entre l'eau et le solide durant l'ascension du complexe bulle/particules. En effet, les grosses particules subissent davantage l'effet de la friction que les petites particules puisque que leur surface est plus grande. Le diamètre des bulles est une caractéristique très importante puisqu'il détermine aussi la surface disponible pour l'adhésion des particules hydrophobes. La surface totale disponible augmente avec la réduction du diamètre des bulles.

En conséquence, il est important de procéder à la classification de la pulpe avant d'accomplir la séparation par flottation. De plus, la présence de particules ultrafines a un effet négatif sur la flottation. Leur présence peut engendrer deux phénomènes, soit une augmentation de la consommation de collecteur et une flottation parasitaire. À cause de leur surface spécifique très élevée, les petites particules produisent un effet dramatique sur la consommation de collecteur. Pour sa part, la flottation parasitaire se traduit par la présence indésirable de particules hydrophiles très fines dans la

mousse. Ces dernières sont entraînées accidentellement car elles sont sensibles aux turbulences provoquées par l'ascension des bulles d'air.

4.4.2 Préparation de la pulpe et réactifs de flottation

La pulpe doit subir une certaine préparation avant la flottation. En minéralurgie, le minerai broyé est habituellement combiné à l'eau pour former une pulpe contenant entre 5 et 50% de solides sur une base massique (Gill, 1991). Différents agents de flottation sont préalablement ajoutés à la pulpe afin que ses propriétés correspondent aux conditions appropriées à une flottation efficace.

La pulpe doit être exempte de toute agglomération. Comme la flottation est un phénomène de surfaces, ces dernières doivent être entièrement libres. La première étape de préparation repose donc sur la dispersion des particules à l'aide d'agents dispersants lorsque nécessaire. La pulpe est introduite dans un réservoir de conditionnement agité afin d'assurer l'homogénéité du matériel. Les agents dispersants sont habituellement ajoutés dans ce réservoir ou injectés dans la conduite d'alimentation du réservoir. La figure 4.27 présente un exemple de réservoir de conditionnement.

Le réservoir de conditionnement peut parfois être remplacé par une cellule d'attrition lorsqu'une agitation plus violente est requise. L'attrition a pour fonction de détacher les particules fines qui adhèrent aux grosses particules et de nettoyer les particules de la couche de contaminants qui les enrobe par friction des particules les unes contre les autres. En traitement de minerai, l'attrition est effectuée afin de libérer les surfaces de la couche d'oxydation qui peut les enrober. L'équipement qui accomplit cette tâche est constitué d'un réservoir muni de deux axes d'agitation sur lesquels sont fixées deux hélices (figure 4.28). La vitesse de rotation des axes est très élevée afin d'assurer une agitation intense. Pour que l'attrition soit efficace, la densité de la pulpe doit être

relativement élevée. Plusieurs équipements de conditionnement et d'attrition sont décrits par Weiss (1985).

Lorsque les minéraux qui doivent être concentrés ne sont pas hydrophobes de façon naturelle, des agents de flottation appelés collecteurs sont ajoutés. Les collecteurs sont des molécules organiques ou des ions qui sont adsorbés sélectivement sur certaines surfaces afin de les rendrent hydrophobes. Ce sont donc les agents de

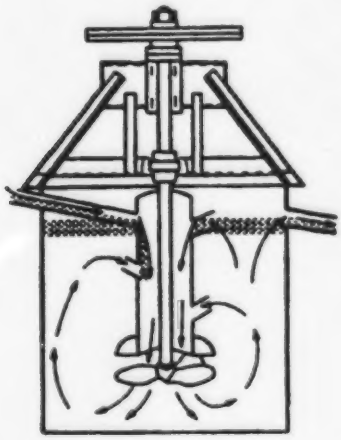


Figure 4.27 - Réservoir de conditionnement Denver (source: Wills, 1988)

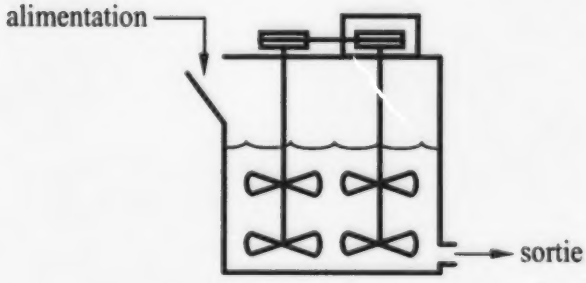


Figure 4.28 - Cellule d'attrition

flottation les plus importants et les plus critiques. Les collecteurs sont généralement des composés hétéropolaires. Comme il est possible de le constater à la figure 4.29, la partie polaire est adsorbée à la surface de la particule tandis que la partie non-polaire est orientée vers l'extérieur afin d'exposer une surface hydrophobe (Gill, 1991).

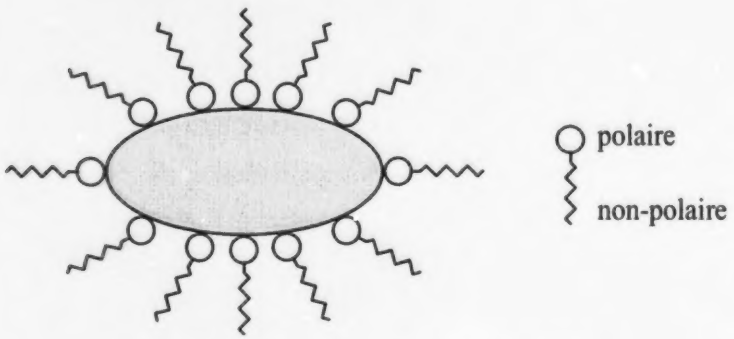


Figure 4.29 - Mode d'action d'un collecteur

L'activité des collecteurs varie grandement en fonction du pH. Celui-ci doit être ajusté par l'ajout d'une base ou d'un acide. La valeur optimale de pH dépend de la nature du minéral (ou substance contaminante) qui doit être concentré par flottation ainsi que du collecteur utilisé. Les conditions optimales de pH sont habituellement prescrites par les manufacturiers de collecteurs. Une telle précaution a souvent pour conséquence de diminuer considérablement la consommation de collecteur (Kelly et Spottishwood, 1982).

Les moussants sont des agents tensioactifs hétéropolaires de nature organique qui sont adsorbés aux interfaces air/eau (bulles). Les molécules des moussants comportent une tête polaire orientée vers l'eau et une queue non-polaire orientée vers l'air (Gill, 1991). Le mode d'action d'un moussant est présenté à la figure 4.30.

Les deux principales fonctions des moussants sont d'assurer une dispersion de bulles fines dans la pulpe et de maintenir une stabilité adéquate de la mousse qui flotte à la surface de la pulpe. En effet, la mousse doit être suffisamment stable dans le but d'éviter le relargage des particules hydrophobes dans la pulpe. Par contre, une mousse trop ferme aura pour effet de nuire au traitement subséquent du concentré obtenu par la flottation (Weiss, 1985).

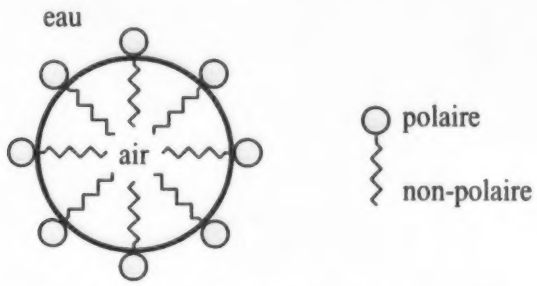


Figure 4.30 - Mode d'action d'un moussant

Les déprimants sont des composés inorganiques dont l'action consiste habituellement à enduire les surfaces d'une façon sélective dans le but de les rendre plus hydrophiles et de diminuer leur affinité pour les collecteurs. L'utilisation des déprimants augmente la sélectivité de la flottation en prévenant la flottation des particules indésirables. L'activité des déprimants varie en fonction du pH de la pulpe (Wills, 1988).

Les activants sont généralement des sels solubles qui s'ionisent en milieu aqueux. Les ions en solution réagissent avec les surfaces pour favoriser l'adsorption du collecteur. Les activants sont utilisés lorsque les collecteurs et les moussants ne parviennent pas à accomplir la flottation adéquatement. Comme dans le cas des collecteurs et des déprimants, l'activité des activants varie en fonction du pH du milieu (Wills, 1988).

Plusieurs manufacturiers produisent des collecteurs, des moussants, des déprimants et des activants. Des listes de ces différents produits sont présentées dans "SME

Mineral Processing Handbook" (Weiss, 1985). De nombreux renseignements sont disponibles dans ces tableaux dont le nom du manufacturier, le nom du produit, la composition chimique du produit, les minéraux favorisés, les dosages et les conditions de flottation.

Les différents réactifs de flottation peuvent être ajoutés simultanément dans le réservoir de conditionnement. Cependant, l'efficacité de la flottation est accrue lorsque l'addition de chaque réactif est effectuée par étapes successives (Wills, 1988). L'ordre dans lequel ces étapes doivent être effectuées est présenté à la figure 4.31. Cet ordre est établi en fonction de la nature et de la fonction des réactifs (Gill, 1991).

ajustement du pH / dispersants ⇨ activants / déprimants ⇨ collecteurs ⇨ moussants

Figure 4.31 - Ajout des réactifs de flottation durant la préparation de la pulpe

L'addition des réactifs peut être accomplie à l'aide d'une pompe péristaltique en différents points du circuit de flottation comme dans les réservoirs de conditionnement ou directement dans les conduites d'alimentation. Lors de l'ajout d'un collecteur, d'un déprimant ou d'un activant, le temps de conditionnement doit être suffisamment long afin de permettre aux différentes réactions chimiques d'avoir lieu. Il s'agit d'une pratique courante qui permet de réduire le temps de flottation (Wills, 1988).

Chaque matrice et chaque substance contaminante est un cas unique. Il convient donc d'identifier les réactifs de flottation requis et les conditions adéquates pour chaque situation par des essais en laboratoire. Cependant, les manufacturiers sont une source d'information indispensable qu'il ne faut pas négliger de consulter.

4.4.3 Les cellules de flottation

Les cellules de flottation font partie des équipements mécaniques de flottation. Elles sont composées d'un réservoir muni d'une turbine entourée de chicanes dont une des fonctions est d'assurer l'homogénéité de la pulpe (voir figure 4.32). L'air est alimenté dans le système par l'axe de la turbine. L'aération peut être effectuée de façon autonome grâce à la rotation très rapide de la turbine qui produit une pression négative et aspire l'air. L'aération peut aussi être produite à l'aide d'une soufflante à faible pression. L'air qui est introduit dans le système est violemment dispersé dans la pulpe sous forme de fines bulles grâce à l'action de la turbine et des chicanes (Gill, 1991).

La finesse des bulles est une caractéristique importante puisqu'elle détermine la surface disponible pour l'adhésion des particules hydrophobes. Le concentré composé de la mousse chargée de particules hydrophobes est récupéré par débordement dans le haut de la cellule. Un écumeur peut faciliter la récupération de la mousse. Pour les flottations opérées en continu, le rejet est soutiré par le bas du réservoir. La flottation en cellule peut être effectuée à petite échelle en laboratoire et à l'échelle indutrielle. À l'échelle industrielle, les cellules sont disposées en série pour former des bancs de cellules. Un exemple de banc de cellules est présenté à la figure 4.33.

La pulpe est introduite dans le premier réservoir où une partie des particules hydrophobes est récupérée dans la mousse. Ensuite, la pulpe est introduite dans le deuxième réservoir où d'autres particules hydrophobes sont récupérées. Le procédé est répété d'une cellule à l'autre jusqu'à la dernière cellule où très peu de particules hydrophobes sont récupérées. Le rejet sortant de cette dernière cellule est constitué de la matrice relativement décontaminée. Le niveau de la pulpe augmente d'une cellule à l'autre, ce qui diminue simultanément l'épaisseur de la couche de mousse.

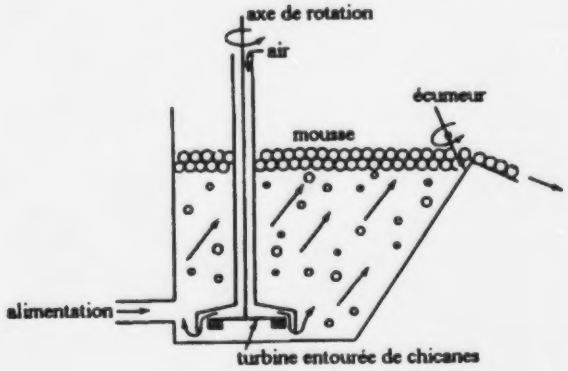


Figure 4.32 - Section transversale d'une cellule de flottation (source: Gill,1991)

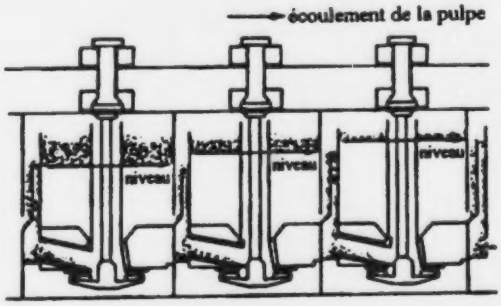


Figure 4.33 - Banc de cellules de flottation (source: Wills, 1988)

La couche de mousse de la dernière cellule est la plus mince car elle est très pauvre en particules (Wills, 1988). Les circuits de flottation peuvent être composés de plusieurs équipements de flottation en série ou en parallèle. Les termes épuisement (scavenging), dégrossissage (roughing) et nettoyage (cleaning) sont utilisés pour décrire les différentes fonctions des équipements de flottation.

La capacité des cellules de flottation varie en fonction du volume du réservoir et peut s'élevée jusqu'à 3800 m^3/h pour une pulpe comportant 25% de solides d'une masse volumique de 2,7 g/cm^3 (Kelly et Spottishwood, 1982).

4.4.4 Les colonnes de flottation

Les colonnes de flottation font partie des équipements pneumatiques de flottation. Elles ont été développées récemment et sont particulièrement efficaces pour traiter les particules fines. Leurs coûts d'achat et d'opération sont avantageusement bas (Wills, 1988).

Les colonnes de flottation sont principalement composées d'un long tube vertical (voir figure 4.34). L'air est alimenté dans le système l'aide d'un diffuseur qui disperse l'air sous pression en de fines bulles. La pulpe est alimentée par pompage dans la colonne. Le point d'alimentation se situe à 1/3 du haut de la colonne et délimite les deux zones qui caractérisent le fonctionnement de la colonne.

La zone inférieure se distingue par un mouvement à contre-courant qui favorise le contact entre les bulles d'air ascendantes et les particules. Les particules entre en collision avec les bulles et adhèrent à celles-ci lorsqu'elles sont de nature hydrophobe. Les bulles d'air chargées continuent leur ascension jusqu'à la zone supérieure. Cette partie constitue la zone de lavage. En effet, un jet d'eau de lavage est vaporisé sur la mousse qui flotte en haut de la colonne. L'eau qui s'écoule au travers de la mousse entraîne les particules indésirables afin d'assurer leur retour parmi la pulpe.

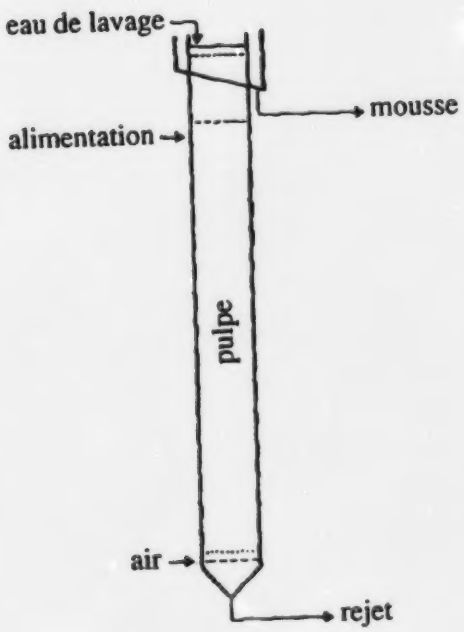


Figure 4.34 - Colonne de flottation (source: Wills, 1988)

Le concentré (mousse) est récupéré par débordement en haut de la colonne et le rejet (matrice décontaminée) est soutiré par pompage dans le bas. Le débit de soutirage du rejet doit être plus élevé que le débit d'alimentation afin de favoriser la circulation de la pulpe vers le bas. Une telle circulation assure le mouvement à contre-courant dans la partie inférieure de la colonne.

La colonne de flottation comporte deux principaux avantages par rapport à la cellule de flottation. Premièrement, la flottation parasitaire est réduite par l'ajout de l'eau de lavage. Deuxièmement, les chances de collision entre les bulles d'air et les particules sont augmentées grâce à la hauteur de la colonne qui peut s'élever jusqu'à 15 mètres pour les applications industrielles (Gill, 1991). Comme dans le cas des cellules, la flottation en colonne peut être effectuée à petite échelle ainsi qu'à l'échelle industrielle. Pour les essais en laboratoire, les colonnes de flottation peuvent être fabriquées de façon artisanale à faible coût.

La capacité des colonnes de flottation est principalement fonction de son volume. Elle peut s'élever jusqu'à 230 m^3/h pour une pulpe comportant 25% de solides d'une masse volumique de 2,7 g/cm^3 (Kelly et Spottishwood, 1982). La capacité des colonnes est plus faible que celle des cellules mais leur efficacité est plus élevée.

4.4.5 Concentration des contaminants organiques par flottation

La concentration des contaminants organiques par flottation déborde du domaine de la minéralurgie. L'application de cette technique nécessite une condition essentielle: les substances contaminantes doivent posséder un caractère hydrophobe. Il est donc possible de concentrer par flottation des substances comme les hydrocarbures pétroliers, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les biphényles polychlorés (BPC). Ces substances ont une forte affinité pour l'air et auront tendance à s'adsorber à la surface des bulles d'air durant la flottation. Par observation à l'aide d'un microscope optique, il est possible de discerner un mince film de substances

contaminantes qui couvre les bulles d'air. Conséquemment, la mousse flottant à la surface de l'équipement de flottation est chargée de contaminants organiques. La flottation des contaminants organiques peut être accomplie à l'aide de la cellule ou de la colonne de flottation.

Cependant, les substances contaminantes en question sont visqueuses et ont tendance à enrober les particules solides, ce qui complique leur séparation. La séparation par flottation doit être précédée d'une étape qui accomplira leur décollement des particules solides. Plusieurs procédés sont capables d'effectuer cette tâche. Ils impliquent l'utilisation de la chaleur, de la friction, des ultrasons ou de surfactants.

Un des procédés de récupération des produits pétroliers dans les sables bitumineux repose sur l'utilisation de la chaleur, il s'agit du procédé à l'eau chaude ("Hot Water Process"). La pulpe est chauffée à une température de 80-90°C et son pH est ajusté entre 8,0 et 8,5. Après conditionnement, la pulpe est introduite dans une cellule de séparation qui est alimentée par le bas avec de l'air. Une mousse chargée d'hydrocarbures pétroliers est récupérée sur le dessus (Kirk et Othmer, 1983). L'application de cette technique peut probablement s'étendre aux BPC.

La frottement des particules les unes contre les autres peut accomplir le décollement des substances contaminantes par friction. Les cellules d'attrition (voir section 4.4.2) couramment utilisées dans le traitement de minerai peuvent être employées à cet effet. L'action des cellules d'attrition est accentuée grâce à la chaleur dégagée par la friction entre les particules. Il est important de rappeler que l'efficacité de ces équipements augmente avec la densité de la pulpe (pourcentage de solides).

Les ultrasons sont des ondes de même nature que le son mais dont la fréquence est beaucoup plus élevée (20 kHz et plus). Les ultrasons sont communiqués à la pulpe à l'aide d'une sonde conçue à cet effet. Les vibrations qui sont ainsi transmises à la pulpe provoquent de la friction entre les particules tout en dégageant de la chaleur.

Le décollement des substances contaminantes a lieu de la même façon que dans les cellules d'attrition. Cependant, cette technique n'est pas conventionnelle.

Les surfactants sont des produits qui accomplissent sensiblement la même rôle que les détergents (par exemple, les détergents pour la lessive). Ils ont pour effet de réduire le caractère hydrophobe des contaminants organiques à un niveau tel qu'ils se détachent des particules solides. Les molécules de surfactants sont hétéropolaires comme les molécules de moussants (voir figure 4.30). Après avoir contribuer au détachement des substances contaminantes, la présence de surfactants engendre la formation de globules semblables aux bulles d'air. Les globules peuvent ensuite être séparés par flottation grâce à leur grande affinité pour les bulles d'air. La flottation des contaminants dans les sédiments à l'aide de surfactants a fait l'objet d'une vaste étude par l'Agence de Protection Environnementale des États-Unis (U.S. EPA, 1994b).

4.4.6 Conditions d'application

L'utilisation des équipements de flottation est limitée par des conditions spécifiques quant à l'intervalle granulométrique à l'intérieur duquel ils fonctionnent de façon efficace. Le tableau suivant résume ces conditions d'application et présente la capacité maximale de chaque équipement accompagnée de son appréciation qualitative. Les unités de capacité dont il est question dans ce tableau doivent être interprétées comme des tonnes métriques de solide sec par heure. De plus, les valeurs de capacité s'appliquent uniquement au traitement de minerai et peuvent varier pour les applications environnementales.

Il est important de souligner que, même si l'intervalle granulométrique est le même pour les deux équipements, l'efficacité des colonnes de flottation est beaucoup plus élevée que celle des cellules dans la portion la plus fine de l'intervalle en question.

De plus, la limite supérieure de l'intervalle peut augmenter en présence de matériel léger (masse volumique faible) comme le charbon.

Tableau 4.5 - Application et capacité des appareils de flottation

Appareil	Intervalle granulométrique	Capacité maximale	Appréciation de la capacité
Cellule de flottation	5 µm à 212 µm	1130 t/h *	très élevée
Colonne de flottation	5 µm à 212 µm	70 t/h **	moyenne

* Pour une pulpe constituée à 25% de solides (base massique) d'une masse volumique de 2,7 g/cm^3, 3800 m^3/h ≅ 1130 t/h

** Pour une pulpe constituée à 25% de solides (base massique) d'une masse volumique de 2,7 g/cm^3, 230 m^3/h ≅ 70 t/h

4.5 La séparation magnétique

4.5.1 Principes

La séparation magnétique exploite les propriétés magnétiques des matériaux afin d'effectuer leur séparation. La susceptibilité magnétique est la propriété d'un matériau qui détermine son comportement dans un champ magnétique. À partir de cette propriété, les matériaux peuvent être divisés en trois classes. La première classe est composée des matériaux ferromagnétiques dont la susceptibilité magnétique est très forte. La deuxième classe comporte des matériaux paramagnétiques qui présentent une susceptibilité magnétique faible. La troisième classe est constituée des matériaux diamagnétiques possédant une susceptibilité nulle (Gill, 1991).

La séparation magnétique est accomplie par entraînement des matériaux susceptibles lors de leur passage à travers un champ magnétique (figure 4.35). Ce dernier peut être produit à l'aide d'un aimant permanent ou d'un électroaimant. L'utilisation des électroaimants comporte plusieurs avantages dont la possibilité d'ajuster l'intensité du champ magnétique en variant l'intensité du courant électrique. De plus, le champ magnétique produit par les électroaimants peut atteindre une intensité plus élevée que l'intensité d'un champ engendré par des aimants permanents (Gill, 1991).

La grosseur et la masse volumique des particules ou morceaux devant être séparés influencent le traitement. La séparation des grosses particules denses requiert un champ magnétique plus intense que la séparation des petites particules légères (Gill, 1991). Il est essentiel de souligner que l'efficacité du procédé dépend du degré de libération ou de la pureté des matériaux à séparer.

Il existe deux catégories d'équipements de séparation magnétique: les séparateurs à haute intensité et les séparateurs à faible intensité. Chaque catégorie peut être divisée en deux, soit les séparateurs humides et les séparateurs à sec. Les séparateurs à faible intensité sont utilisés pour séparer les matériaux ferromagnétiques et certains matériaux paramagnétiques hautement susceptibles (Wills, 1988). Les séparateurs à haute intensité présentent des coûts d'achat et d'opération très élevés. En effet, la production d'un champ magnétique intense entraîne une consommation élevée d'électricité. La valeur des minerais traités par cette méthode justifie de tels coûts. Cependant, il est douteux de spéculer sur la rentabilité des applications environnementales d'une telle méthode. En conséquence, seuls les équipements de séparation à faible intensité seront abordés dans ce document.

Un exemple de séparateur à faible intensité en milieu sec ainsi qu'un exemple de séparateur à faible intensité en milieu humide seront présentés dans les sections qui suivent. Certains matériaux ferromagnétiques qui ont été séparés à l'aide de ces

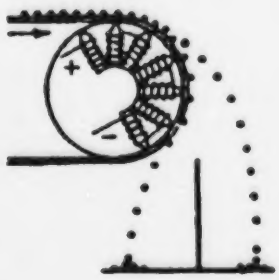


Figure 4.35 - Entraînement des particules susceptibles de séparation magnétique (source: Taggart, 1951)

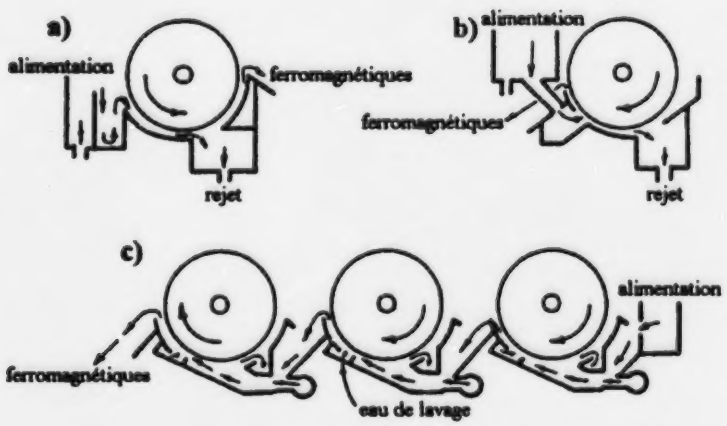


Figure 4.36 - Séparateurs magnétiques humides à tambour (source: Gill, 1991)
a) séparateur à concourant, b) séparateur à contre-rotation et
c) séparateur à contre-courant

équipements doivent parfois subir une démagnétisation. Après leur passage à travers un champ magnétique, ils ont tendance à acquérir un magnétisme résiduel qui provoque leur agglomération. Un tel phénomène peut nuire au traitement subséquent des produits obtenus.

4.5.2 Le convoyeur à tête magnétique

Le convoyeur à tête magnétique est l'équipement de séparation à faible intensité en milieu sec le plus couramment utilisé. Il s'agit d'un convoyeur à courroie muni d'un aimant stationnaire inséré à l'intérieur d'une des poulies qui actionnent la courroie. Les matériaux magnétiques sont retenus sur la courroie et tombent sous la poulie lorsqu'ils sortent du champ magnétique. Les matériaux non-magnétiques ne sont pas retenus et suivent une trajectoire normale (Gill, 1991). La figure 4.35 (section précédente) présente le schéma de ce système.

La capacité de ces équipements dépend de l'épaisseur de matériel qui circule sur le convoyeur ainsi que de la largeur du convoyeur. La vitesse maximale des convoyeurs à aimant permanent est de 130,5 m/min et celle des convoyeurs à électroaimant est de 150 m/min (Gill, 1991). L'efficacité diminue lorsque la vitesse augmente et lorsque l'épaisseur de matériel augmente. Le taux d'humidité du matériel à séparer doit être le plus bas possible afin d'éviter l'agglomération des particules. L'utilisation de ces équipements s'applique au traitement de matériaux grossiers de taille supérieure à 0,5 cm (Wills, 1988).

4.5.3 Le séparateur humide à tambour

Le séparateur humide à tambour est un équipement de séparation magnétique à faible intensité en milieu humide. Il est constitué d'un cylindre rotatif dont la partie inférieure baigne dans la pulpe. L'intérieur du cylindre abrite un aimant permanent ou un électroaimant stationnaire qui ne suit pas le tambour dans sa rotation. Le

principe de la séparation qui a lieu dans cet équipement est le même que celui du convoyeur à tête magnétique. Il existe trois versions différentes de cet appareil: le séparateur à concourant, le séparateur à contre-rotation et le séparateur à contre-courant. Ils sont illustrés à la figure 4.36.

L'utilisation de ces équipements est limitée par des intervalles granulométriques différents. Le séparateur à concourant est utilisé pour le traitement des grosses particules d'une taille de 6,36 mm et moins, le séparateur à contre-rotation pour le traitement des particules d'une taille de 1,70 mm et moins et le séparateur à contre-courant pour le traitement des particules plus petites que 0,21 mm. La capacité maximale de ces appareils est respectivement de 1875, 1500 et 900 l/min par mètre de largeur du cylindre (Gill, 1991).

4.5.4 Conditions d'application

L'utilisation des équipements de séparation magnétique est limitée par l'intervalle granulométrique à l'intérieur duquel ils fonctionnent de façon efficace. Le tableau suivant résume ces conditions d'application et présente la capacité maximale de chaque équipement. De plus, les valeurs de capacité s'appliquent uniquement au traitement de minerai et peuvent varier pour les applications environnementales.

Tableau 4.6 - Application et capacité des appareils de séparation magnétique

Appareil	Limite granulométrique	Capacité maximale
Convoyeur à tête magnétique (aimant permanent)	> 0,5 cm	130,5 m/min *
Convoyeur à tête magnétique (électro-aimant)	> 0,5 cm	150 m/min *
Séparateur humide à tambour (concourant)	< 6,36 mm	1875 l/min.m
Séparateur humide à tambour (contre-rotation)	< 1,70 mm	1500 l/min.m
Séparateur humide à tambour (contre-courant)	< 0,21 mm	900 l/min.m

* La capacité réelle doit être déduite à l'aide de l'épaisseur de matériel qui circule sur la courroie et de la largeur de la courroie.

4.6 La séparation électrostatique

4.6.1 Principes

La séparation électrostatique tire profit de la différence de conductivité électrique qui existe entre les matériaux afin d'accomplir leur séparation. Cette technique s'applique à un nombre relativement restreint de minéraux tels que le rutile, l'ilménite, le zircon, l'étain, les phosphates et certains sels. Elle peut aussi s'appliquer à la séparation de particules métalliques dans le sable (Gill, 1991).

Il existe deux types de séparateurs électrostatiques: les séparateurs électrostatiques et les séparateurs électrodynamiques (aussi appelés séparateurs à haute tension). Seuls les séparateurs électrodynamiques sont abordés dans ce document car il s'agit des équipements les plus utilisés actuellement. Cependant, le principe de séparation est sensiblement le même pour les deux équipements.

Le séparateur électrodynamique est composé d'un cylindre mis à la terre et de charge positive, d'une électrode ionique de charge négative et d'une électrode statique de charge négative (figure 4.37). Les particules constituant l'alimentation tombent sur le cylindre et passent à travers un faisceau d'ions mobiles en provenance de l'électrode ionique. Les particules qui présentent une faible conductivité électrique acquièrent une forte charge de surface négative et restent collées à la surface du cylindre. Pour leur part, les particules conductrices n'acquièrent pas de charge et suivent une trajectoire normale. Cette trajectoire les mène dans le champ d'attraction de la seconde électrode (l'électrode statique). Elle a pour fonction d'attirer les particules conductrices loin du cylindre afin d'augmenter la sélectivité de la séparation. Ces dernières tombent ensuite par gravité à une bonne distance du cylindre. Les particules non-conductrices restent collées au cylindre tout au long du processus. Un balai qui est disposé à l'opposé des électrodes permet de détacher ces particules afin de les récupérer.

La capacité maximale de ces équipements est de 1,5 tonnes métriques de solides secs par heure et par mètre de largeur du cylindre (Gill, 1991). Les séparateurs électrodynamiques ne disposent donc pas d'une capacité élevée. De plus, la valeur de la capacité s'applique uniquement au traitement de minerai et peut varier pour les applications environnementales.

4.6.2 Conditions d'application

L'utilisation des équipements de séparation électrostatique est appropriée pour les particules dont la taille est comprise entre 60 et 500 µm. Cependant, la capacité diminue considérablement pour les particules de 75 µm et moins (Wills, 1988). Il est essentiel de souligner que l'application de la séparation électrostatique nécessite une condition primordiale: la matériel à traiter doit être parfaitement sec car la présence d'humidité altère le comportement des particules (Taggart, 1951). Pour terminer, la séparation de particules métalliques dans le sable est probablement l'application environnementale la plus avantageuse de la séparation électrostatique.

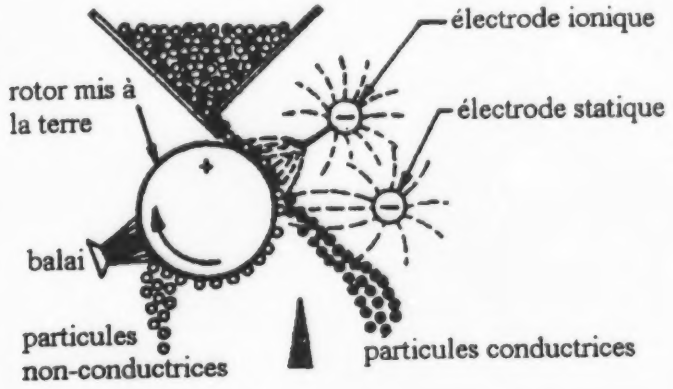


Figure 4.37 - Séparateur électrodynamique (source: Gill, 1991)

Chapitre 5

Sélection de la technologie appropriée

Les résultats de la caractérisation par l'approche minéralurgique procurent des informations indispensables à la sélection des équipements et à l'élaboration d'un schéma de traitement. Ces informations portent sur la taille des particules, leur masse volumique, les propriétés de leur surface, le degré de libération des substances contaminantes, les propriétés ferromagnétiques ainsi que la conductivité électrique des substances contaminantes présentes. L'application des équipements minéralurgiques qui ont été décrits au chapitre précédent nécessite des conditions particulières qui se trouvent en relation directe avec les informations obtenues grâce à la caractérisation par l'approche minéralurgique. Les exigences particulières à l'application des différentes technologies seront exposées.

De plus, chaque matrice (sédiment, sol, boue) comporte des caractéristiques spécifiques qui imposent des contraintes et influencent le choix des équipements de traitement. Ces contraintes

qui entraînent aussi des répercussions sur la procédure d'échantillonnage seront revues dans le présent chapitre.

À partir des informations obtenues par la caractérisation et des exigences particulières aux différentes technologies, il est possible d'établir une stratégie qui contribuera à orienter le choix des équipements minéralurgiques appropriés. Les étapes préalables au traitement (tamisage et classification) ainsi que les étapes subséquentes (déshydratation, traitement des eaux de procédé et des résidus) qui sont requises sont ensuite fixées en fonction du choix qui a été effectué. Par combinaison de tous ces éléments, un schéma préliminaire de traitement est obtenu. À l'aide d'essais en laboratoire et à l'échelle pilote, il est possible de vérifier et d'optimiser les performances de ce schéma de traitement. Les informations obtenues à la suite de ces deux étapes permettent d'évaluer sommairement les coûts associés à la réalisation du projet de décontamination.

5.1 Exigences particulières aux différentes technologies

5.1.1 Concentration gravimétrique

La concentration gravimétrique exploite la gravité pour effectuer la séparation entre les particules de masses différentes. La masse d'un corps sphérique dépend de son diamètre ainsi que de la masse volumique du matériau qui le constitue. Conséquemment, l'application de la concentration gravimétrique est fonction de la taille des particules. Celle-ci doit se situer entre 1 µm et 5 cm. De plus, les matériaux à séparer doivent habituellement présenter une différence de masse volumique de plus de 1 g/cm^3. Les espèces à séparer doivent aussi être libres, c'est-à-dire qu'elles ne doivent pas être liées à d'autres espèces ou à la matrice. Lorsqu'un grain est composé de deux espèces différentes, sa masse volumique varie en fonction des proportions des espèces présentes et correspond à une valeur intermédiaire à celles de ces espèces

distinctes. Un degré de libération élevé a pour effet de faciliter la séparation en assurant une différenciation prononcée entre les masses volumiques des grains.

5.1.2 Flottation

La concentration par flottation repose sur les propriétés hydrophobes et hydrophiles (naturelles ou stimulées) des surfaces des contaminants. Ces dernières doivent donc être libres en partie ou en entier. La stabilité du complexe particules/bulle d'air dépend de la taille des particules. En effet, les grosses particules (diamètre supérieur à 212 µm) ont tendance à se détacher de la bulle sous l'action de la friction avec l'eau durant l'ascension du complexe particules/bulles d'air. Pour leur part, les particules très fines (diamètre inférieur à 5 µm) sont extrêmement sensibles aux turbulences provoquées par l'ascension des bulles d'air. La flottation parasitaire est souvent occasionnée par leur présence.

5.1.3 Séparation magnétique

La séparation magnétique à faible intensité nécessite avant toute chose que les matériaux à séparer présentent des propriétés ferromagnétiques adéquates. Si cette condition n'est pas respectée, la séparation magnétique ne s'applique pas. Cependant, le degré de libération doit aussi être élevé. Aucune séparation n'a lieu lorsque le matériel à séparer est entièrement constitué de grains qui comportent à la fois des espèces ferromagnétiques et des espèces non-ferromagnétiques. De plus, la séparation magnétique ne s'applique pas aux particules fines de diamètre inférieur à 75 µm. En deçà de ce diamètre, la force de traînée de la pulpe excède la force du champ magnétique et les particules fines sont entraînées par la pulpe (Kelly et Spottishwood, 1982).

5.1.4 Séparation électrostatique

L'application de la séparation électrostatique est conditionnelle à la présence d'une différence de conductivité électrique entre les matériaux à séparer. De plus, les espèces conductrices ne doivent pas être incorporées ou liées à des espèces isolantes (degré de libération élevé). L'intervalle granulométrique approprié pour ce type séparation est compris entre 60 et 500 µm. La valeur supérieure est limitée par le poids des particules. Le comportement des particules fines et conductrices (diamètre inférieur à 60 µm) est influencé par la charge de surface acquise par les particules non-conductrices. Cette influence se traduit par un entraînement des fines particules conductrices par les particules non-conductrices. Finalement, il est essentiel que le matériel à séparer soit complètement sec.

5.1.5 Résumé des exigences

L'application des différentes méthodes minéralurgiques exige certaines conditions particulières à chacune. Le tableau 5.1 résume ces conditions.

Tableau 5.1 - Résumé des exigences particulières aux différentes technologies minéralugiques

Propriété	Concentration gravimétrique	Flottation	Séparation magnétique	Séparation électrostatique
Diamètre des particules	1 µm à 5 cm	5 à 212 µm	> 75 µm	60 à 500 µm
Différence de masse volumique	> 1	n.a.	n.a.	n.a.
Degré de libération	élevé	moyen	moyen	élevé
Propriétés de surface	n.a.	élevée	n.a.	n.a.
Propriétés ferromagnétiques	n.a.	n.a.	élevée	n.a.
Conductivité électrique	n.a.	n.a.	n.a.	élevée

n.a. non-applicable

5.2 Contraintes relatives aux différentes matrices

5.2.1 Les sédiments

Les sédiments se distinguent souvent par une granulométrie très fine. Les résultats de l'analyse granulométrique doivent être pris en considération lors du choix des équipements. De plus, la présence de matière organique dans les sédiments lacustres et fluviaux peut être significative lorsqu'ils proviennent de zones fortement sédimentaires (courant d'eau très faible). Les contaminants ont généralement une grande affinité pour la matière organique et peuvent s'y adsorber. La matière organique peut être séparée aisément grâce à la différence considérable qui existe entre la masse volumique de la matière organique et celle de la matrice sédimentaire.

5.2.2 Les sols

Les sols sont caractérisés par leur nature hétérogène tant au niveau de la composition chimique et minéralogique qu'au niveau de la granulométrie. La répartition des contaminants peut donc se présenter aussi de façon hétérogène. Comme dans le cas des sédiments, la présence de matière organique doit être prise en considération.

5.2.3 Les boues

Les boues sont caractérisées par une grande variabilité de composition en fonction du type d'activité industrielle qui les génère. La granulométrie peut se révéler très étendue et la présence de particules très fines ainsi que de particules colloïdales est susceptible de causer des difficultés de traitement puisque les équipements qui ont été décrits ne couvrent pas cette gamme de particules (diamètre inférieur à 1 µm).

5.3 Stratégie d'élaboration d'un schéma de traitement

5.3.1 Sélection des équipements

La sélection des équipements minéralurgiques appropriés repose sur les informations obtenues grâce à la caractérisation par l'approche minéralurgique. La figure 5.1 rappelle ces informations ainsi que l'importance d'un échantillonnage représentatif.

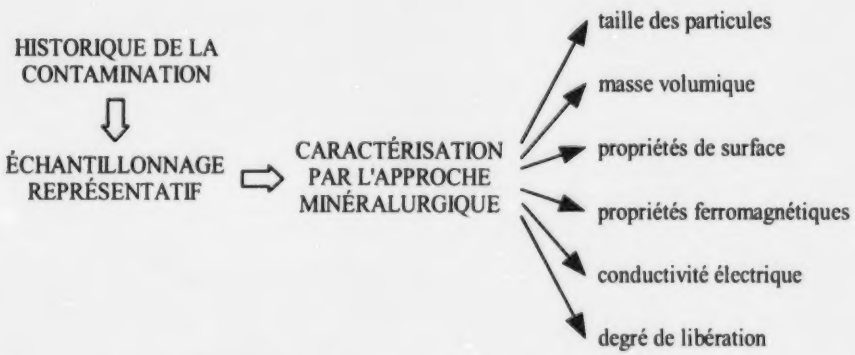


Figure 5.1 - Les informations obtenues grâce à la caractérisation par l'approche minéralurgique d'un échantillon représentatif

Ces différentes informations doivent être analysées en suivant un ordre spécifique. En conséquence, la figure 5.2 illustre la stratégie à suivre lors de la sélection du type d'équipements minéralurgiques. La première information à considérer dans le processus décisionnel est le degré de libération des substances inorganiques contaminantes. Si les substances inorganiques contaminantes ne sont pas libres, les équipements minéralurgiques ne peuvent pas être utilisés et d'autres techniques doivent être envisagées. Par contre, il est possible, dans certaines situations, de procéder au broyage et/ou au concassage du matériel afin d'augmenter le degré de libération. Si elles sont libres, il faut alors considérer la taille des particules. Quand le matériel est principalement composé de très fines particules (diamètre < 1μm), l'utilisation des équipements minéralurgiques n'est pas appropriée. Dans le cas contraire, il suffit de décider quel type

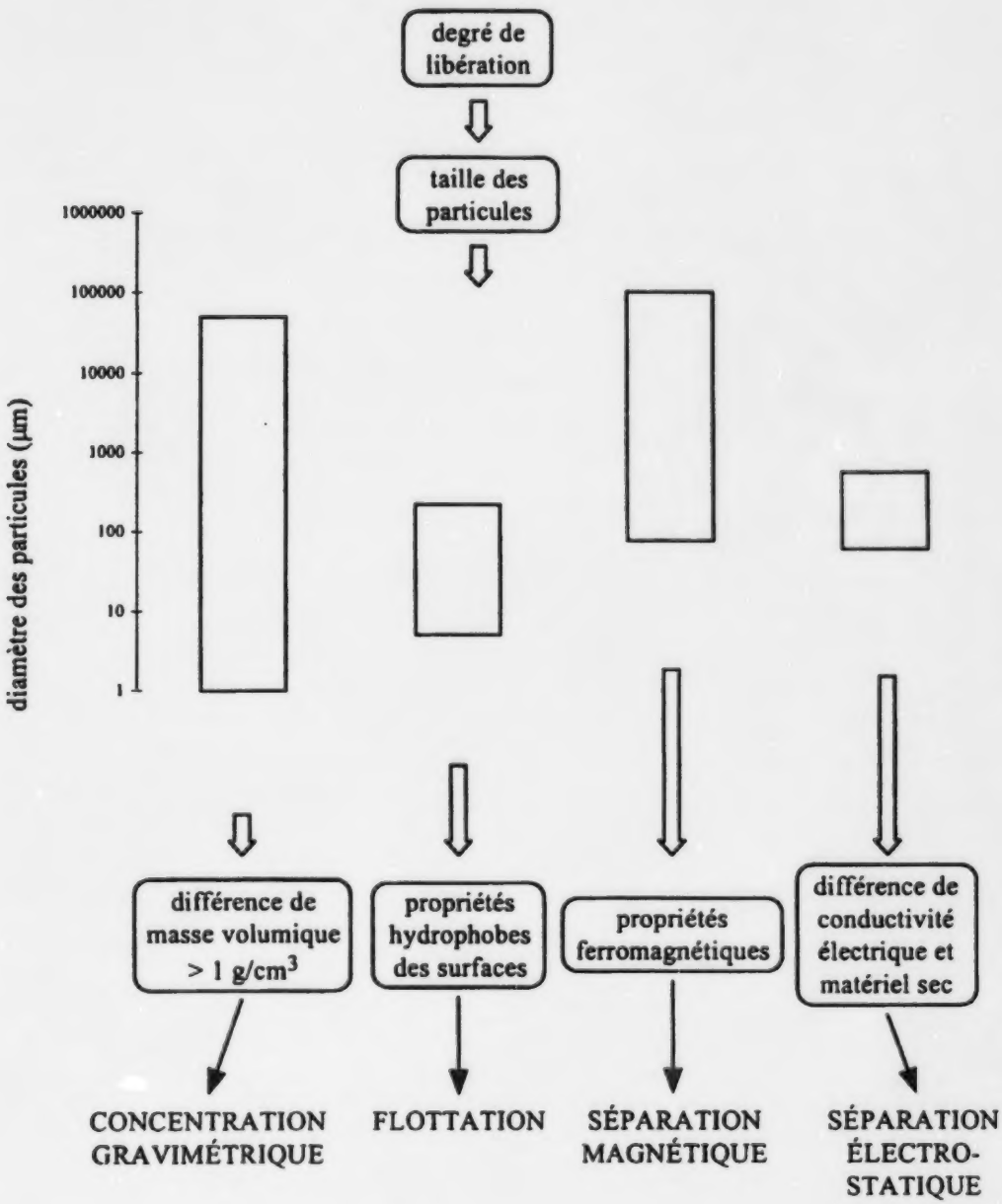


Figure 5.2 - Stratégie de sélection des équipements minéralurgiques

d'équipement peut être utilisé en fonction des différentes fractions granulométriques qui ont été identifiées.

La différence de masse volumique, les propriétés hydrophobes des surfaces, les propriétés ferromagnétiques ainsi que la différence de conductivité électrique doivent être considérées successivement si plusieurs types d'équipements peuvent être employés.

À la fin de ce cheminement, il est possible que plusieurs types d'équipements minéralurgiques se révèlent appropriés pour effectuer la décontamination. Il faut alors tenir compte du facteur économique afin de procéder à la sélection du type d'équipement approprié.

D'une façon générale, les équipements de concentration gravimétrique sont favorisés par rapport aux autres types d'équipements en raison de leur faible coût (achat et opération). Par ailleurs, seule la flottation peut être employée pour la décontamination de substances organiques de nature hydrophobe comme les hydrocarbures pétroliers et les biphényles polychlorés (section 4.4.5).

Lorsque le matériel à traiter comporte une granulométrie étendue, il est souvent utile de procéder à une séparation du matériel par classification. Les fractions granulométriques les plus importantes (2 à 4) sont préalablement identifiées grâce à l'analyse granulométrique. Ensuite, les types d'équipements minéralurgiques appropriés sont sélectionnés pour chaque fraction identifiée.

Après l'identification et l'évaluation du type d'équipement approprié (concentration gravimétrique, flottation, séparation magnétique ou séparation électrostatique), il suffit de choisir le ou les équipements les plus appropriés en fonction de la granulométrie, des capacités et des performances désirées (tableaux 4.4, 4.5 et 4.6).

5.3.2 Élaboration du schéma préliminaire de traitement

Il est possible que les résultats de la caractérisation par l'approche minéralurgique révèlent que la fraction grossière du matériel est très peu ou pas contaminée. Lorsque que tel est le cas, le traitement doit être précédé par un tamisage afin de séparer la portion du matériel qui ne doit pas subir le traitement. Les équipements de tamisage sont sélectionnés en fonction du point de coupure désiré et de la granulométrie du matériel (tableau 4.1).

Comme il a été vu à la section précédente, le matériel doit être séparé par classification en différentes fractions granulométriques pour la majorité des cas. Comme pour les équipements de tamisage, les équipements de classification doivent être choisis en fonction de la granulométrie du matériel, du point de coupure, de la capacité et des performances désirées (tableau 4.2).

Les produits obtenus à la suite du traitement comporte un rejet constitué de la matrice décontaminée ainsi qu'un ou des concentrés de substances contaminantes. Ces différents produits doivent parfois être déshydratés pour certaines raisons spécifiques (transport, enfouissement, revalorisation). L'épaississement en bassin, la filtration et la centrifugation font partie des techniques de déshydratation disponibles. Cependant, l'eau obtenue à la suite de la déshydratation peut être contaminée et devra, dans ce cas, être traitée convenablement. Les eaux de procédé peuvent aussi être recirculées. La déshydratation, le traitement et la recirculation des eaux de procédé sont des sujets qui n'ont pas été détaillés dans le présent document car il existe une littérature abondante à leur propos (Ramalho, 1983, Degremont, 1989, Coulson & Richardson, 1991, Wills, 1988, Centre St-Laurent, 1994 et U.S. EPA, 1994a).

Les concentrés de contaminants peuvent parfois être revalorisés lorsqu'ils contiennent des quantités appréciables de métaux intéressants (or, argent, cuivre, ...) ou de matières combustibles (hydrocarbures pétroliers). Cependant, chaque cas doit être

étudié pour établir si la revalorisation est rentable car les concentrés doivent souvent subir des traitements subséquents dispendieux avant leur revalorisation. Par exemple, un concentré de contaminants inorganiques comprenant des métaux tels que l'or, l'argent ou le cuivre peut être acheminé vers une fonderie à forfait. En échange, un montant d'argent appréciable peut être accordé en fonction de la valeur des métaux en question. Par contre, le montant accordé est réduit si des impuretés (bismuth, cadmium, arsenic, ...) sont présentes dans le concentré. Les bénéfices récoltés grâce à une telle alternative sont difficilement chiffrables car ils varient considérablement en fonction de la composition et la qualité du concentré.

Le tamisage, la classification, le traitement à l'aide des équipements minéralurgiques, la déshydratation, la recirculation et le traitement des eaux de procédé constituent les composantes du schéma de traitement. La figure 5.3 présente d'une façon simplifiée un schéma préliminaire de traitement. Ce schéma illustre un exemple fictif car, dans chaque cas, le schéma élaboré est spécifique au site qui a été caractérisé (approche minéralurgique). Les équipements de séparation électrostatique ne sont pas illustrés car ils représentent un cas très spécifique. Comme ce type de technologie nécessite fréquemment un séchage préliminaire dont les coûts sont élevés, l'avantage d'une telle approche doit être étudié attentivement afin d'évaluer sa rentabilité.

5.3.3 Validation et optimisation du schéma de traitement

La validation du schéma préliminaire de traitement doit être accomplie en laboratoire et/ou à l'échelle pilote. En effet, il est possible d'effectuer des essais à petite échelle pour la plupart des équipements qui ont été décrits dans le chapitre précédent. À la suite de la validation, il peut être intéressant de procéder à l'optimisation du schéma de traitement. Les données ainsi recueillies peuvent ensuite être utilisées lors de l'évaluation sommaire des coûts de traitement. Au Québec, le Centre de Recherches

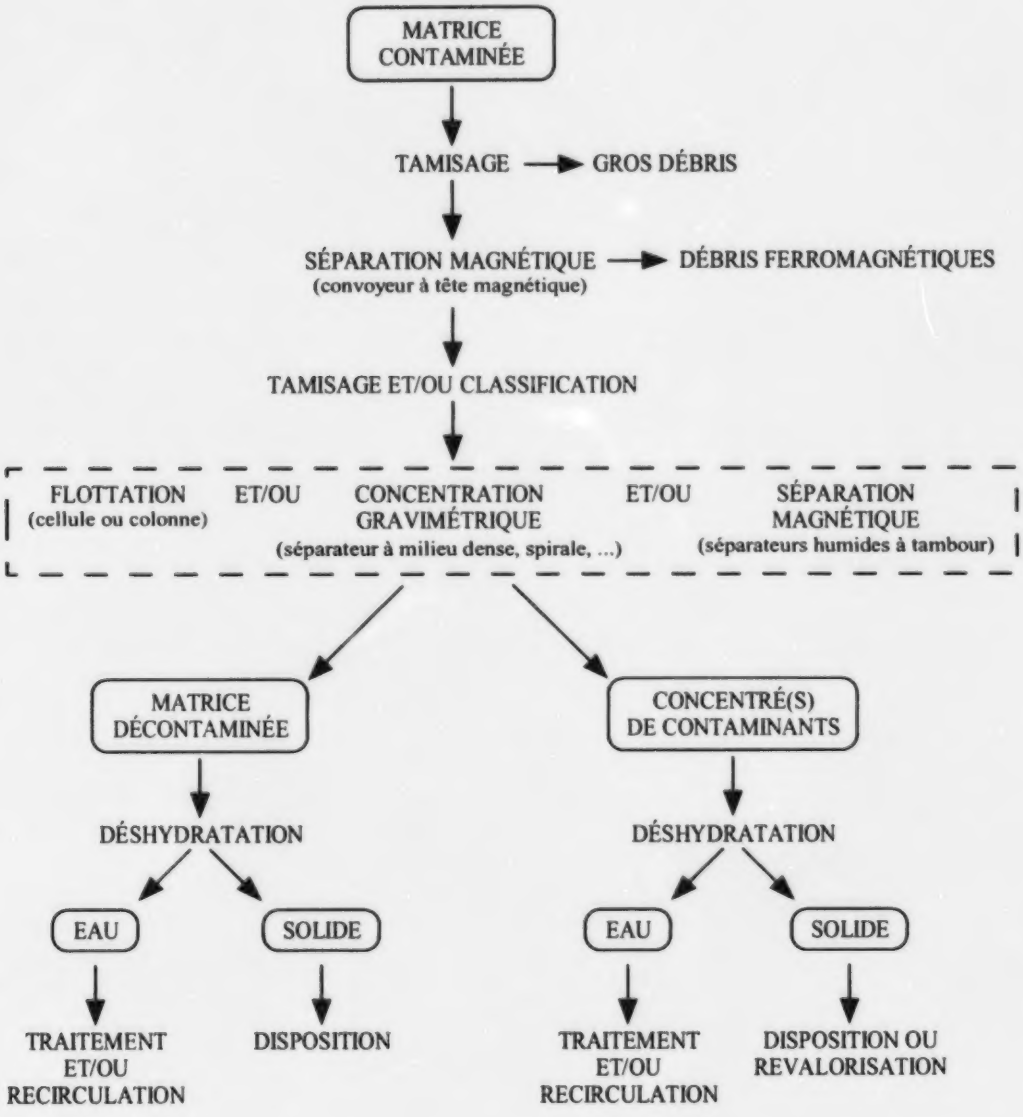


Figure 5.3 - Schéma simplifié de traitement

Minérales dispose d'une station d'essais où peuvent être effectués les essais de validation et d'optimisation par un personnel qualifié.

Les essais en laboratoire nécessitent 50 à 100 kg de matériel sur une base sèche et les coûts reliés à leur réalisation varient entre $10 000 et $20 000. Pour leur part, les essais à l'échelle semi-industrielle nécessitent une dizaine de tonnes de matériel sur une base sèche et les coûts reliés à leur réalisation varient entre $100 000 et $200 000. Les chiffres avancés ici sont très approximatifs car ils varient avec le type de matrice et la complexité de la contamination (cas par cas).

Quant à l'évaluation sommaire des coûts reliés à réalisation d'un projet de décontamination, elle doit reposer sur les données obtenues lors de la validation et l'optimisation du schéma préliminaire de traitement. Par contre, une évaluation plus précise des coûts devra reposer sur des données obtenues à la suite d'essais accomplis à l'échelle semi-industrielle (environ à l'échelle 1/100).

Les coûts d'achat des équipements peuvent être évalués en contactant directement les fournisseurs. Une liste de principaux fournisseurs d'équipements minéralurgiques est présentée chaque année dans "Mining Annual Review" (publié par Mining Journal, Londres). On y présente un annuaire professionnel, un guide des acheteurs ainsi qu'un index des manufacturiers.

Chapitre 6

Conclusions et recommandations

Le présent document a pour objectif principal de conseiller les différents intervenants dans la planification, la conception, l'évaluation et la réalisation d'essais de traitabilité par les technologies minéralurgiques (concentration gravimétrique, flottation, séparation magnétique et séparation électrostatique), lesquelles offrent un potentiel considérable pour extraire les contaminants des sédiments, des sols et des boues contaminés. Contrairement aux méthodes usuelles de caractérisation, la méthode de caractérisation par l'approche minéralurgique procure de nombreuses informations sur le potentiel et les limites de ces technologies pour le traitement ou la valorisation des matrices contaminées. Ces informations permettent de localiser les contaminants dans les différentes tranches granulométriques et d'identifier la composition minéralogique ainsi que certaines propriétés physiques des particules que les équipements minéralurgiques peuvent exploiter pour extraire les contaminants.

Il est aussi essentiel de rappeler que la valeur des résultats de la caractérisation dépend en grande partie de la représentativité des échantillons analysés. Lorsque les résultats de la caractérisation confirment l'applicabilité de l'approche minéralurgique, il est possible d'élaborer un schéma préliminaire de traitement qui devra ensuite être validé à l'aide d'essais en laboratoire ou à l'échelle pilote. Le schéma élaboré à cette occasion n'est valable que pour le site qui a fait l'objet de l'étude. Toute extrapolation d'applicabilité à un autre site doit toujours être confirmée par la caractérisation ainsi que par une validation à l'aide d'essais à petite échelle.

En plus de permettre la décontamination facile et économique des sols, des sédiments et des boues, les procédés minéralurgiques peuvent être aussi avantageusement appliqués pour le traitement et la valorisation des déchets municipaux, industriels et miniers lorsque les contaminants présents sont sous une forme libre et non agglomérés, fondus ou associés chimiquement à la matrice.

Les technologies minéralurgiques sont applicables dans les cas où :

- les contaminants inorganiques visés ne sont pas liés à la matrice;
- la granulométrie du matériel est adéquate;
- les valeurs d'une ou plusieurs de leurs propriétés physiques présentent suffisamment d'écart pour que la séparation soit possible.

Les technologies de traitement physique décrites dans le document ne sont pas applicables lorsque la granulométrie des matériaux est inférieure à 1 µm pour la concentration gravimétrique, à 5 µm pour la flottation, à 75 µm pour la séparation magnétique et à 60 µm pour la séparation électrostatique. Les technologies hydrométallurgiques et pyrométallurgiques n'ont pas été décrites bien que la méthode de caractérisation présentée puisse aussi être utile à la détermination de leur applicabilité. Ces technologies pourraient s'appliquer lorsque la granulométrie des matériaux est inférieure aux limites citées précédemment.

La procédure de caractérisation par l'approche minéralurgique s'applique exclusivement à la traitabilité des différentes matrices à l'aide des technologies minéralurgiques. Elle ne convient donc pas à l'évaluation des risques environnementaux et aux autres études de ce genre (suivi environnemental).

Les recommandations suivantes font suite au présent document :

- les objectifs des projets doivent être bien clairs puisqu'ils exercent une grande influence sur le volume d'échantillons à prélever. En effet, la quantité de matériel nécessaire pour réaliser uniquement une caractérisation est petite par rapport à celle nécessaire pour réaliser des essais de traitabilité à l'échelle laboratoire ou semi-industrielle;

- une attention particulière doit être portée à la représentativité des échantillons;

- avant de procéder aux analyses, les laboratoires doivent connaître l'historique et la nature de la contamination puisque ces deux paramètres ont une grande influence sur le choix des méthodes analytiques qui seront utilisées;

- il est préférable de consulter des spécialistes (minéralogistes, métallurgistes, ...) pour effectuer les études de caractérisation et les différents essais de traitabilité. Les départements universitaires (mine et métallurgie) et les centres de recherches disposent habituellement de ce genre de spécialistes;

- une évaluation raisonnable des coûts reliés à la réalisation d'un projet de décontamination (par l'approche minéralurgique) doit reposée sur des données acquises grâce à des essais à l'échelle semi-industrielle (environ 1/100 de l'échelle industrielle visée).

Références

Association française pour l'étude des eaux. Analyse des boues, Tome N°1 - Généralités et analyse physique. Paris; 1985.

Barrow, G. M. Physical chemistry. 5ième ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1988; p. 859.

Bergeron, M.; St-Laurent, H.; Blackburn, D., et Gosselin, A. Développement d'un procédé de traitement de sédiments contaminés par utilisation de technologies minéralurgique. Section du développement technologique, Direction de la protection de l'environnement, Environnement Canada; 1997; Rapport présenté par l'INRS-Géoressources et le Centre de Recherches Minérales à Verreault Navigation et Environnement Canada.

Blazy, P. La valorisation des minerais. Paris: Presses Universitaires de France; 1970; p. 416.

Boivin, A. Répertoire des méthodes d'analyse en usage dans la division fluorescence X. Sainte-Foy, Québec: Centre de recherches minérales, Ministère des ressources naturelles; 1989.

Burt, R. O. Gravity Concentration Technology. Fuerstenau, D. W. Developments in Mineral Processing - Volume 5. Amsterdam: Elsevier Science Publishers; 1984; p. 605.

Centre St-Laurent. Guide pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés. Document rédigé par Jean-René Michaud, Direction du développement technologique; 1994; N° de catalogue : En40-450/1993F.

Conseil canadien des ministres de l'environnement. Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés, Volume I: Rapport principal. 1993; Rapport CCME EPC-NCS62F.

--. Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés, Volume II: Sommaires des méthodes d'analyse. 1993; CCME EPC-NCS66F.

Coulson, J. M. et Richardson, J. F. Chemical Engineering, Volume 2: Particle Technology and Separation Process. 4ième édition ed. Oxford: Pergamon Press; 1991; p. 968.

De Blois, C. Méthodes d'analyse de diverses substances minérales, Tome 4: Analyse par volumétrie, gravimétrie, spectrophotométrie UV-visible et infrarouge et chromatographie ionique et gazeuse. Sainte-Foy, Québec: Centre de recherches minérales, Ministère de l'Énergie et de Ressources; 1992.

Degremont. Memento Technique de l'eau, Tome 1 et 2. 1989.

Environnement Canada. Document d'orientation sur le prélèvement et la préparation de sédiments en vue de leur caractérisation physicochimique et d'essais biologiques. 1994; Rapport SPE 1/RM/29.

Environnement Canada et Centre St-Laurent. Guide Méthodologique de Caractérisation des Sédiments. Ministre des Approvisionnements et Services Canada; 1992; No. de catalogue EN40-412/1991F.

Gagné, R. Méthodes d'analyse de diverses substances minérales, Tome 1: Analyses par spectrophotométrie d'adsorption atomique et spectrométrie d'émission atomique au plasma et fluorométrie. Sainte-Foy, Québec: Centre de recherches minérales, Ministère des ressources naturelles; 1990.

Gill, C. B. Materials Beneficiation. New York: Springer-Verlag; 1991; p. 245.

Hurlbut, C. S. et Klein, C. Manual of mineralogy. 19ième ed. New York: John Wiley & sons, Inc.; 1977; p. 549.

Jones, M. H. et Woodcock, J. T. Principles of Mineral Flotation. Victoria, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy; 1984; p. 320.

Keith, L. H. Environmental Sampling and Analysis: A Practicle Guide. Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc.; 1991; p. 143.

Kelly, E. G. et Spottiswood, D. J. Introduction to Mineral Processing. New York: John Wiley & Sons; 1982; p. 479.

Kirk, R. E. et Othmer, D. F. Tar Sands. Encyclopedia of Chemical Technology. 3ième édition ed. New York: John Wiley & Sons; 1983; pp. 601-627.

Knelson, B. The Knelson Concentrator: Metamorphosis From Crude Beginning to Sophisticated World Wide Acceptance. Minerals Engineering. 1992; 5(10-12):1091-1097.

Kröning, H. Separation and dewatering of silt from the port of Hamburg. Aufbereitungs-Technik Mineral Processing . 1990; 31(4):205-214.

Ministère de l'environnement. Procédure d'évaluation des caractéristiques des déchets solides et des boues pompables.: Ministère de l'environnement, Direction des laboratoires; 1985; p. 29.

Ministère de l'environnement et de la faune. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales - Cahier 1: Généralités. Ste-Foy: Les éditions le Griffon d'argile 1994.

---. Problématique des sols et des eaux souterraines contaminés par des produits pétroliers: sélection des paramètres analytiques. Sainte-Foy, Québec: Publications du Québec; 1995.

---. Conservation et analyse des échantillons d'eau et de sol: guide des méthodes. Sainte-Foy, Québec: Publication du Québec; 1996.

Plumpton, A. J. Le CRM à l'avant-garde en matière de concentration gravimétrique. CRM En Bref, Bulletin D'Information Du Centre De Recherche Minérale. 1996; Juin:1-4.

Ramalho, R. S. Introduction to Wastewater Treatment Processes. 2ième édition ed. New York: Academic Press; 1983; c1983 pp. 80-132.

Richards, R. H. et Locke, C. E. Textbook of ore dressing. 3ième édition ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1940; p. 608.

Rochon, R. et Chevalier M. Échantillonnage et conservation des sédiments en vue de la réalisation des projets de dragage. Environnement Canada, Conservation et Protection, Région du Québec; 1987.

Taggart, A. F. Handbook of mineral dressing. New York: John Wiley & sons, Inc.; 1945.

---. Elements of ore dressing. 3ième édition ed. New York: John Wiley & sons, Inc.; 1951; p. 595.

Traoré A.; Conil, P.; Houot, R., et Save, M. Récents développements dans le traitement des particules fines. Exposition de l'industrie minérale; 1993; Grenoble. 1993.

U.S. EPA. Test Method for Evaluating Solid Wastes, Volume IIa, SW846, Part III, Chap. 9.; 1986.

--. Engineering Bulletin: Soil Washing Treatment. Cincinnati, OH: Center for Environmental Research Information; 1990 Sep; EPA/540/2-90/017.

--. Demonstration Bulletin: Soil Recycling Treatment Train - The Toronto Harbour Commissioners. Cincinnati, OH: Center for Environmental Research Information, Superfund Innovative Technology Evaluation; 1992 Nov; EPA/540/MR-92/015.

--. Demonstration bulletin: BESCORP Soil Washing System Alaskan Battery Enterprises Site - Brice Environmental Services Corporation. Cincinnati, OH: Center for Environmental Research Information, Superfund Innovative Technology Evaluation; 1993 Feb; EPA/540/MR-93/503.

--. EPA RREL's mobile volume reduction unit - Applications analysis report. Washington, DC: Office of research and development, Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE); 1993 Aug; EPA/540/AR-93/508.

--. ARCS Remediation Guidance Document. Chicago, IL: Great Lakes National Program Office; 1994a; EPA 905-B94-003.

--. Assessment and Remediation Of Contaminated Sediments (ARCS) Program - Mineral Processing Pretreatment of Contaminated Sediments. Chicago, IL: Great Lakes National Program Office; 1994b Oct; EPA 905-R94-022.

Weiss, N. L. SME Mineral Processing Handbook. New York: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc.; 1985.

Wills, B. A. Mineral Processing Technology . 4ième édition ed. Oxford: Pergamon Press; 1988; p.855.

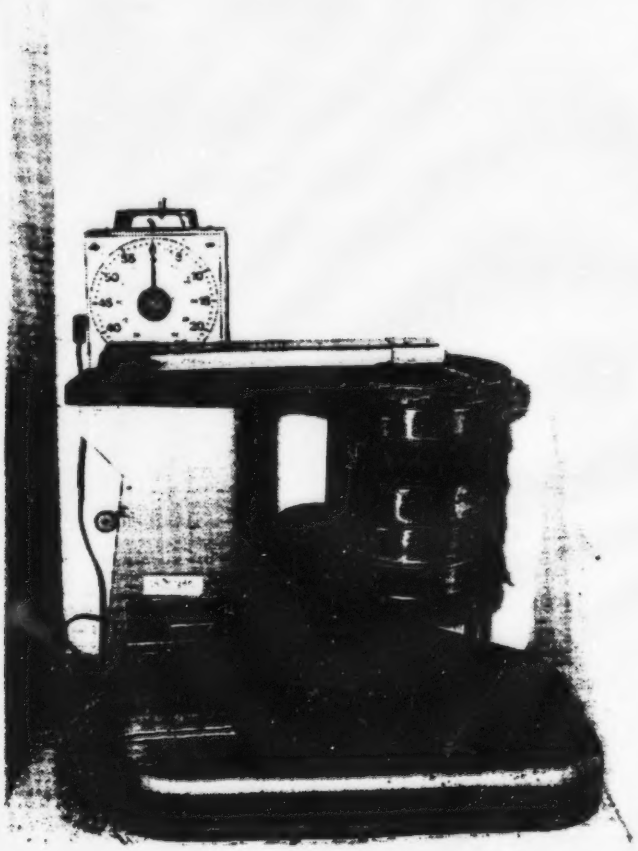
Annexe A

Tableau des séries complètes des tamis

Série standard ASTM	Série américaine Tyler (mailles)
8,0 mm	2 ½
6,7 mm	3
5,6 mm	3 ½
4,75 mm	4
4,00 mm	5
3,35 mm	6
2,80 mm	7
2,36 mm	8
2,00 mm	9
1,70 mm	10
1,40 mm	12
1,18 mm	14
1,00 mm	16
850 µm	20
710 µm	24
600 µm	28
500 µm	32
425 µm	35
355 µm	42
300 µm	48
250 µm	60
212 µm	65
180 µm	80
150 µm	100
125 µm	115
106 µm	150
90 µm	170
75 µm	200
63 µm	250
53 µm	270
45 µm	325
38 µm	400

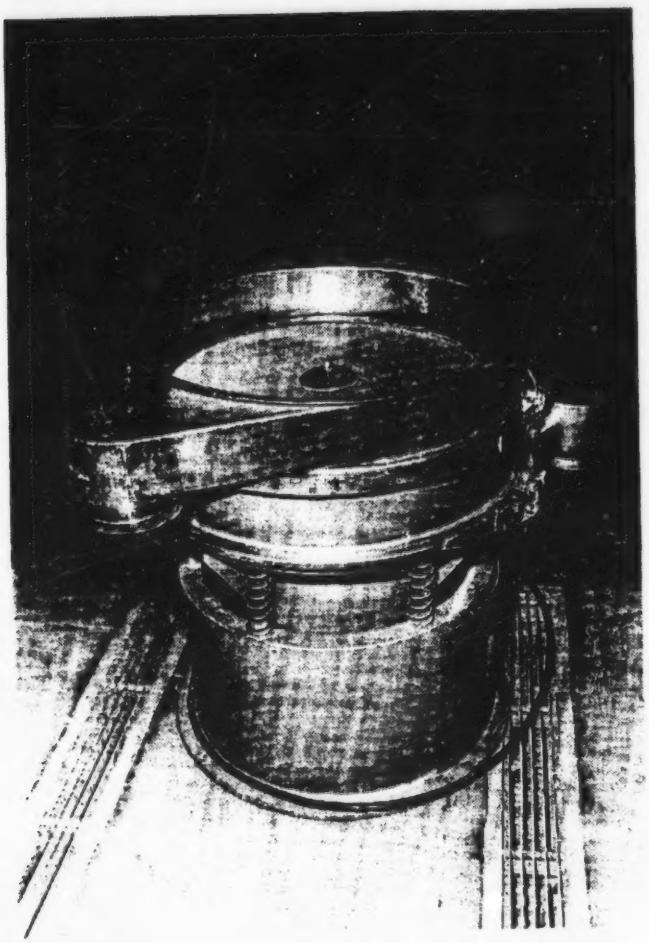
Annexe B

Tamiseuse à étages multiples (Ro-Tap)



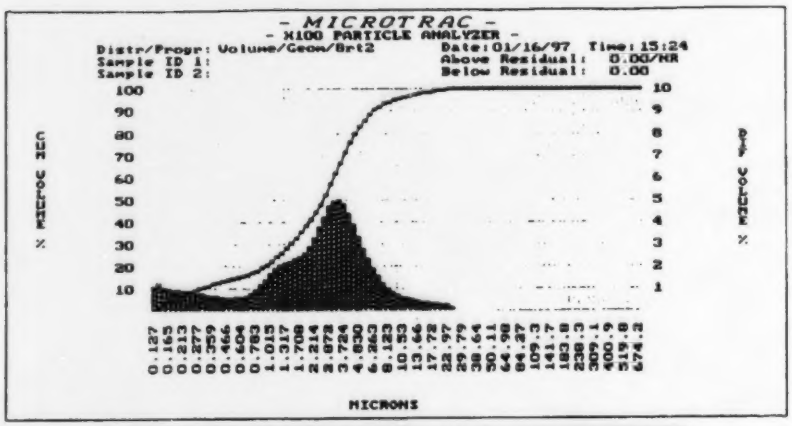
Annexe C

Tamiseuse humide (Sweco)



Annexe D

Résultats typiques d'une analyse granulométrique avec le Microtrac



- MICROTRAC X100 PARTICLE ANALYZER -
Percent Passing Data
Version 6.01

Centre de Recherches Minerales	ASVR Parameters Flow Rate: n/a ml/sec Ultrasonic Power: n/a watts Ultrasonic Time: n/a seconds

Meas/Prog #: 721 - 1 Param #2: 0.000 Lot code:
Param #1: 0.000 Param #3: 0.000 Account#:

Id #1: Distrib. Format: Volume Filter: On Run Time: 30 seconds Run Number: 3 of 3 runs Transmission: 0.87 Laser Int: 1.001/1.001/1.009 Residuals: Disabled Above Residual: 0.00 Below Residual: 0.00	Summary Data CV = 0.0567 10% = 0.296 50% = 2.647 90% = 6.426 MV = 3.307 MN = 0.477 MA = 0.948 GM = 5.331 SD = 2.237	Id #2: Date: 01/16/97 Time: 15:24 Chan. Progression: Geom/Brt2 Upper Channel Edge: 704.0 Lower Channel Edge: 0.122 Number of Channels: 100 Fluid Refractive Index: n/a Particle Transparency: Absorb Spherical Particles: n/a Part. Refractive Index: n/a

ch top	%pass	%-chn	ch top	%pass	%-chn	ch top	%pass	%-chn	ch top	%pass	%-chn
704.0	100.00	0.00	80.27	100.00	0.00	9.250	43.72	0.84	1.069	22.12	1.69
615.6	100.00	0.00	71.00	100.00	0.00	8.112	42.15	1.01	0.972	20.64	1.41
592.0	100.00	0.00	67.86	100.00	0.00	7.778	41.14	1.24	0.892	19.72	1.19
547.9	100.00	0.00	64.23	100.00	0.00	7.133	40.30	1.38	0.818	18.76	1.47
497.8	100.00	0.00	57.06	100.00	0.00	6.541	39.37	1.48	0.748	17.68	1.80
456.5	100.00	0.00	52.33	100.00	0.00	5.998	38.49	1.51	0.685	16.28	1.69
418.6	100.00	0.00	47.98	100.00	0.00	5.500	36.48	1.80	0.630	14.59	1.62
383.9	100.00	0.00	44.00	100.00	0.00	5.044	34.68	1.80	0.578	12.97	1.56
352.0	100.00	0.00	40.35	100.00	0.00	4.625	32.88	1.80	0.530	11.41	1.54
322.8	100.00	0.00	37.00	100.00	0.00	4.241	30.98	1.90	0.486	9.87	1.54
296.0	100.00	0.00	33.93	100.00	0.00	3.889	29.00	1.98	0.446	8.33	1.54
271.4	100.00	0.00	31.11	100.00	0.00	3.566	26.92	2.08	0.409	6.79	1.54
248.9	100.00	0.00	28.53	100.00	0.00	3.270	24.76	2.16	0.375	5.25	1.54
228.2	100.00	0.00	26.16	100.00	0.00	2.999	22.60	2.16	0.344	3.71	1.54
209.3	100.00	0.00	23.99	99.42	0.27	2.750	20.44	2.16	0.315	2.17	1.54
191.9	100.00	0.00	22.00	99.05	0.37	2.522	18.28	2.16	0.289	0.63	1.54
176.0	100.00	0.00	20.17	98.78	0.27	2.313	16.12	2.16	0.265	0.00	0.63
161.4	100.00	0.00	18.50	98.44	0.34	2.121	13.96	2.16	0.243	0.00	0.00
148.0	100.00	0.00	16.96	98.08	0.36	1.945	11.80	2.16	0.223	0.00	0.00
135.7	100.00	0.00	15.56	97.70	0.38	1.783	9.64	2.16	0.204	0.00	0.00
124.5	100.00	0.00	14.27	97.29	0.41	1.635	7.48	2.16	0.187	0.00	0.00
114.1	100.00	0.00	13.08	96.85	0.44	1.499	5.32	2.16	0.172	0.00	0.00
104.7	100.00	0.00	12.00	96.40	0.45	1.375	3.16	2.16	0.158	0.00	0.00
95.96	100.00	0.00	11.00	95.91	0.49	1.261	1.00	2.16	0.145	0.00	0.00
88.00	100.00	0.00	10.09	95.40	0.51	1.156	0.00	1.00	0.133	0.00	0.00